

*VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ  
TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA  
FAKULTA STROJNÍ  
KATEDRA ENERGETIKY*

**Zvýšení účinnosti kotle o výkonu 210t/h při spalování  
černého uhlí**

**Increasing Efficiency of Boiler 210t/h for Hard Coal  
Combustion**

*Vedoucí diplomové práce:*

*Student:*

*doc. Ing. Ladislav Vilimec*

*Mgr. Lucie Vybíralová*

*Ostrava 2013*

## Zadání diplomové práce

Student: **Mgr. Lucie Vybíralová**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení  
Téma: **Zvýšení účinnosti kotle o výkonu 210 t/h při spalování černého uhlí**  
**Increasing Efficiency of Boiler 210 t/h for Hard Coal Combustion**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši kotlů s granulačním ohništěm pro spalování černého uhlí.
2. Proveďte stechiometrické výpočty a stanovte účinnost kotle.
3. Stanovte rosny bod spalin.
4. Navrhněte možnosti pro zvýšení účinnosti.
5. Vypracujte výpočtový projekt vybraného řešení pro zvýšení účinnosti.

Seznam doporučené odborné literatury:

DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. Skripta ČVUT Praha, 2002. ISBN 80-01-02591-8.  
VILIMEC, L. *Řízení a regulace energetických zařízení*. Skripta VŠB TU Ostrava, 2008.  
ISBN 978-80-248-1853-5.

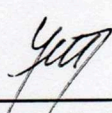
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

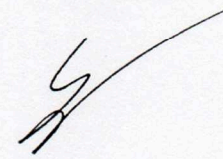
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ladislav Vilimec**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 19. 5. 2013

*[signature]*

podpis studenta



Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst.3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst.4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 19.5.2013

Lucie Vybíralová

Plné jméno studenta

Adresa trvalého pobytu studenta:

Lucie Vybíralová  
Lazníčky 10  
Lazníčky  
751 25



*Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ladislavu Vilimcovi za cenné rady a připomínky, které mi poskytoval při mé práci na diplomovém projektu.*

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

*VYBÍRALOVÁ, L. Využití tepla odchozích spalín z kotle pro ohřev vody. Ostrava: katedra energetiky, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2013, 67s. Diplomová práce, vedoucí Vilimec, L.*

*Diplomová práce se zabývá zvýšením účinnosti kotle o výkonu 210 t/h při spalování černého uhlí. V úvodu je vypracována řešerše kotlů s granulačním ohništěm a stanovení rosného bodu spalín. Pro zvýšení účinnosti byla zvolena možnost použití tepla odchozích spalín za stávajícím ohřívákem vzduchu k většímu ohřátí veškerého vzduchu. Kvůli malému prostoru za stávajícím ohřívákem vzduchu je postupováno opačně, a to tak, že byl navržen ohřívák vzduchu rozměrově vhodný a dle jeho výkonu určeno ochlazení spalín a ohřev vzduchu.*

## **ANNOTATION OF THESIS**

*VYBÍRALOVÁ, L. Heat Utilization of Outgoing Combustion Products from Boiler for Hot Water Preparation. Ostrava: Department of Energy, Faculty of Mechanical Engineering VŠB-Technical University of Ostrava, 2013, 67p. Thesis, head Vilimec, L.*

*This thesis is concerned with increasing the efficiency of boilers of 210 t/h the combustion of coal. The introduction is written research boilers with dry-fire and the establishment of flue gas dew point. To increase efficiency, the option chosen by applying heat outgoing flue for existing air heater for greater heating of all air. Because of the small space behind the existing air heater is followed in reverse, so that the air heater was designed dimensionally suitable and according to the performance of its flue gas cooling and heating of air.*



# Obsah

<i>Obsah</i> .....	7
1. <i>Úvod</i> .....	13
2. <i>Kotle s granulačním ohništěm pro spalování černého uhlí</i> .....	15
2.1. <i>Prášková ohniště</i> .....	15
2.2. <i>Granulační ohniště</i> .....	17
3. <i>Stechiometrické výpočty a stanovení účinnosti kotle</i> .....	19
3.1. <i>Garanční palivo</i> .....	19
4. <i>Rosný bod spalin</i> .....	30
5. <i>Možnosti pro zvýšení účinnosti</i> .....	35
6. <i>Výpočtový projekt vybraného řešení pro zvýšení účinnosti</i> .....	36
<i>Závěr</i> .....	55
<i>Použitá literatura</i> .....	56
<i>Seznam příloh</i> .....	57
<i>Seznam výkresů</i> .....	58

*Seznam použitých označení a symbolů:*

<i>Značka</i>	<i>Veličina</i>	<i>Rozměr</i>
$Q_{ci}$	<i>výhřevnost hořlaviny v tuhých zbytcích</i>	$KJ \cdot Kg^{-1}$
$Z_{sv}$	<i>ztráta sáláním a vedením tepla do okolí</i>	%
$C_u$	<i>podíl uhlíku v úletu</i>	-
$X_s$	<i>podíl popela ve škváře</i>	-
$X_u$	<i>podíl popela v úletu</i>	-
$C_s$	<i>podíl uhlíku ve škváře a strusce</i>	-
$Z_{co}$	<i>ztráta chemickým nedopalem</i>	%
$c_s$	<i>měrná tepelná kapacita tuhých zbytků</i>	$KJ \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$t_s$	<i>teplota tuhých zbytků</i>	$^{\circ}C$
$c_u$	<i>měrná tepelná kapacita tuhých zbytků</i>	$KJ \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$t_u$	<i>teplota tuhých zbytků</i>	$^{\circ}C$
$Z_c$	<i>ztráta mechanickým nedopalem</i>	%
$X_s$	<i>podíl popela ve škváře</i>	-
$Z_{cu}$	<i>ztráta v úletu</i>	%
$C_s$	<i>podíl popílku ve škváře</i>	-
$Z_{cs}$	<i>ztráta ve škváře</i>	%
$i_{co2}$	<i>entalpie <math>CO_2</math></i>	$KJ \cdot Kg^{-1}$
$i_{so2}$	<i>entalpie <math>SO_2</math></i>	$KJ \cdot Kg^{-1}$
$i_{N2}$	<i>entalpie <math>N_2</math></i>	$KJ \cdot Kg^{-1}$
$i_{H2O}$	<i>entalpie <math>H_2O</math></i>	$KJ \cdot Kg^{-1}$
$i_{pop}$	<i>entalpie popílku</i>	$KJ \cdot Kg^{-1}$
$i_s$	<i>entalpie spalin</i>	
$KJ \cdot Kg^{-1}$		
$i_{vz, min}^t$	<i>entalpie min. množství vzduchu nasávaného</i>	$KJ \cdot Kg^{-1}$
$a_u$	<i>podíl popílku v úletu</i>	-
$Z_f$	<i>ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků</i>	%
$i_{vz, t=20}$	<i>entalpie vzduchu při teplotě <math>20^{\circ}C</math></i>	$KJ \cdot Kg^{-1}$
$i_{H2O, t=20}$	<i>entalpie vody při teplotě <math>20^{\circ}C</math></i>	$KJ \cdot Kg^{-1}$
$V_{H2O}^{VZ}$	<i>obsah vody ve vzduchu</i>	$m_N^3 \cdot KJ \cdot Kg^{-1}$
$\varphi_{SO3}$	<i>součinitel konverze (oxidace)</i>	%
$\omega_{SO2}$	<i>koncentrace <math>SO_2</math> ve spalinách</i>	%



$\omega_{SO_3}$	<i>koncentrace <math>SO_3</math> ve spalínách</i>	<i>%</i>
$Q_i^r$	<i>výhřevnost paliva</i>	<i><math>KJ \cdot Kg^{-1}</math></i>
$W^r$	<i>obsah vody v surovém stavu</i>	<i>%</i>
$A^r$	<i>obsah popela v surovém stavu</i>	<i>%</i>
$h^r$	<i>hořlavina v surovém stavu</i>	<i>%</i>
$n$	<i>přebytek vzduchu</i>	<i>-</i>
$v$	<i>součinitel vlhkosti vzduchu</i>	<i>-</i>
$C^h$	<i>obsah uhlíku v hořlavině</i>	<i>%</i>
$H^h$	<i>obsah vodíku v hořlavině</i>	<i>%</i>
$O^h$	<i>obsah kyslíku v hořlavině</i>	<i>%</i>
$N^h$	<i>obsah dusíku v hořlavině</i>	<i>%</i>
$S^h$	<i>obsah síry v hořlavině</i>	<i>%</i>
$C^r$	<i>obsah uhlíku v surovém stavu</i>	<i>%</i>
$H^r$	<i>obsah vodíku v surovém stavu</i>	<i>%</i>
$O^r$	<i>obsah kyslíku v surovém stavu</i>	<i>%</i>
$N^r$	<i>obsah dusíku v surovém stavu</i>	<i>%</i>
$S^r$	<i>obsah síry v surovém stavu</i>	<i>%</i>
$V_{O_2,t}$	<i>množství kyslíku pro spalování</i>	<i><math>m_N^3 \cdot Kg^{-1}</math></i>
$V_{vz,t}^s$	<i>množství vzduchu teoretického suchého</i>	<i><math>m_N^3 \cdot Kg^{-1}</math></i>
$V_{vz,s}^s$	<i>množství vzduchu skutečného suchého</i>	<i><math>m_N^3 \cdot Kg^{-1}</math></i>
$V_{vz,s}^v$	<i>množství vzduchu skutečného vlhkého</i>	<i><math>m_N^3 \cdot Kg^{-1}</math></i>
$V_{sp,t}^s$	<i>množství spalín teoretických suchých</i>	<i><math>m_N^3 \cdot Kg^{-1}</math></i>
$V_{sp,s}^s$	<i>množství spalín skutečných suchých</i>	<i><math>m_N^3 \cdot Kg^{-1}</math></i>
$V_{H_2O}^v$	<i>množství vody ve spalínách</i>	<i><math>m_N^3 \cdot Kg^{-1}</math></i>
$V_{sp,s}^v$	<i>množství spalín skutečných vlhkých</i>	<i><math>m_N^3 \cdot Kg^{-1}</math></i>
$V_{N_2}$	<i>obsah dusíku</i>	<i><math>m_N^3 \cdot Kg^{-1}</math></i>
$V_{O_2}$	<i>obsah kyslíku</i>	<i><math>m_N^3 \cdot Kg^{-1}</math></i>
$V_{CO_2}$	<i>obsah oxidu uhličitého</i>	<i><math>m_N^3 \cdot Kg^{-1}</math></i>
$V_{SO_2}$	<i>obsah oxidu siřičitého</i>	<i><math>m_N^3</math></i>
$\cdot Kg^{-1}$		
$\omega_{CO_2}$	<i>koncentrace <math>CO_2</math> ve spalínách</i>	<i>%</i>
$\omega_{SO_2}$	<i>koncentrace <math>SO_2</math> ve spalínách</i>	<i>%</i>
$\omega_{NO}$	<i>koncentrace <math>NO</math> ve spalínách</i>	<i>%</i>
$\omega_O$	<i>koncentrace kyslíku ve spalínách</i>	<i>%</i>

$\omega_{H_2O}$	koncentrace $H_2O$ ve spalínách	%
$\omega_{N_2}$	koncentrace dusíku ve spalínách	%
$Z_{fs}$	ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků – ztráta ve škváře	%
$Z_{fú}$	ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků – ztráta v úletu	%
$Z_f$	celková ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	%
$Z_k$	komínová ztráta	%
$Z$	celková ztráta kotle	%
$\eta_k$	účinnost kotle	%
$m_{H_2O}$	množství vody do kotle	$kg \cdot s^{-1}$
$Q_t$	tepelný výkon kotle	kW
$m_{pal \text{ přivedeného}}$	množství paliva přivedeného	$kg \cdot s^{-1}$
$m_{pal \text{ skutečného}}$	množství skutečného paliva přivedeného	$kg \cdot s^{-1}$
$V_{SP, \text{efektiv}}$	objem spalín – přepočítáno na teplotu	$m^3 \cdot s^{-1}$
$V_{VZ, \text{efektiv}}$	množství vzduchu skutečného vlhkého – přepočítáno na teplotu	$m^3 \cdot s^{-1}$
$n_{trubek}$	počet trubek	-
$d_{vnitř}$	vnitřní průměr trubky	m
$S_{vnitř}$	vnitřní průřez trubky	$m^2$
$S_{VZ, \text{průtok}}$	celkový průtočný průměr pro vzduch	$m^2$
$v$	rychlost vzduchu	$m \cdot s^{-1}$
$S_{kanálu}$	průřez kanálu	$m^2$
$S_{kanálu, \text{celk}}$	průtočný průřez pro spaliny na celém kotli	$m^2$
$v_{sp}$	rychlost spalín	$m \cdot s^{-1}$
$\alpha_k$	součinitel přestupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$r_{H_2O}$	podíl vodní páry	-
$\alpha_N$	nomogramový součinitel	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$C_z$	opravný součinitel na počet řad	-
$C_s$	opravný součinitel na uspořádání svazku	-
$C_f$	opravný součinitel na podíl vodní páry	-
$\sigma_1$	poměrná příčná rozteč trubek	-
$\sigma_2$	poměrná podélná rozteč trubek	-
$\alpha_{SP}$	přestup tepla na straně spalín	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$\alpha_{vz}$	přestup tepla na straně vzduchu	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$\alpha_{k4x}$	součinitel přestupu tepla pro čtyřnásobnou rychlost vzduchu	



		$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$\alpha_{N4x}$	<i>nomogramový součinitel pro čtyřnásobnou rychlost vzduchu</i>	
		$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$C_l$	<i>opravný součinitel na poměrnou délku proudu</i>	-
$C_f$	<i>opravný součinitel na teplotu proudu</i>	-
$\alpha_{vz4x}$	<i>přestup tepla na straně vzduchu (čtyřnásobná rychlost vzduchu)</i>	
		$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$k$	<i>součinitel prostupu tepla</i>	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$k_{4x}$	<i>součinitel prostupu tepla (čtyřnásobná rychlost vzduchu)</i>	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$\xi$	<i>součinitel využití plochy</i>	-
$t_{sp}$	<i>teplota spalin</i>	$^{\circ}C$
$t_{vz}$	<i>teplota vzduchu</i>	$^{\circ}C$
$Q$	<i>tepelný výkon</i>	$kW$



## 1. Úvod

*Diplomová práce se zabývá možnostmi zvýšení účinnosti kotle o výkonu 210t/h při spalování černého uhlí na elektroteplárně Skawina. Z možností, které připadaly v úvahu, jsem si vybrala možnost zvýšení efektivity využitím dalšího snížení teploty spalin za kotlem ke zvýšení účinnosti kotle ohříváním spalovacího vzduchu.*

*V práci se budu zabývat možností použití tepla odchozích spalin za stávajícím ohřívákem vzduchu k většímu ohřátí veškerého vzduchu.*

*Podle dispozičního umístění kotle je prostor pod stávajícím ohřívákem vzduchu stísněný, proto budu postupovat při návrhu dodatečného ohříváku vzduchu tak, že do daného prostoru navrhnu takový ohřívák, který se do daného prostoru vejde a podle jeho výkonu spočítám o kolik se ochladí spaliny a ohřeje vzduch.*

### *Zadané parametry*

<i>Množství páry</i>	$210 \text{ t/h} = 58,3 \text{ kg/s}$
<i>Teplota páry za kotlem</i>	$540^\circ\text{C}$
<i>Tlak páry za kotlem</i>	$9,8 \text{ MPa}$
<i>Výhřevnost paliva</i>	$20,845 \text{ MJ/kg}$
<i>Obsah vody</i>	$12,3 \%$
<i>Obsah popela</i>	$21,8 \%$
<i>Výhřevnost hořlaviny v tuhých zbytcích</i>	$Q_{ci}=32,6 \text{ MJ/kg}$
<i>Podíl uhlíku v úletu</i>	$c_{\dot{u}}=0,1$
<i>Podíl popela v úletu</i>	$x_{\dot{u}}=0,85$
<i>Ztráta chemickým nedopalem</i>	$z_{co}=0,5 \%$
<i>Měrná tepelná kapacita tuhých zbytků</i>	$c_s=0,9301 \text{ KJ/kg}\cdot\text{K}$
<i>Teplota tuhých zbytků</i>	$t_s=600^\circ\text{C}$
<i>Měrná tepelná kapacita tuhých zbytků</i>	$c_{\dot{u}}=0,8221 \text{ KJ/kg}\cdot\text{K}$
<i>Teplota tuhých zbytků</i>	$t_{\dot{u}}=140^\circ\text{C}$
<i>Podíl popela ve škváře</i>	$x_s=0,1$
<i>Podíl popílku ve škváře</i>	$c_s=0,04$

### *Entalpie při 140°C*

$\text{CO}_2$	$i_{\text{CO}_2} = 245 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
$\text{SO}_2$	$i_{\text{SO}_2} = 272,36 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
$\text{N}_2$	$i_{\text{N}_2} = 181,66 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
$\text{H}_2\text{O}$	$i_{\text{H}_2\text{O}} = 212,16 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
<i>Popílek</i>	$i_{\text{pop}} = 116,24 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
<i>Podíl popílku v úletu</i>	$a_{\dot{u}} = 0,85$
<i>Entalpie vzduchu při teplotě 20°C</i>	$i_{VZ,t=20} = 26,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
<i>Entalpie vody při teplotě 20°C</i>	$i_{\text{H}_2\text{O},t=20} = 31,28 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
<i>Obsah vody ve vzduchu</i>	$V_{\text{H}_2\text{O}}^{VZ} = 0,066 \text{ m}_N^3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

## 2. Kotle s granulačním ohništěm pro spalování černého uhlí

### 2.1. Prášková ohniště

*Při spalování tuhých paliv přichází v úvahu tři technologie spalování, spalování práškové (palivo vyhořívá ve vzduchu), spalování fluidní (ve fluidní vrstvě) a spalování na roštu (ve vrstvě). Volba způsobu spalování závisí na vlastnostech tuhého paliva a také na výkonu kotle. Pro malé výkony kotlů (cca do 50t/h) se používá spalování roštové nebo se stacionární fluidní vrstvou. Pro střední výkony kotlů (cca do 200t/h) přichází v úvahu všechny možnosti spalování, pro široké pásmo od středních až po vysoké výkony kotle (cca do 1000t/h) se používá spalování práškové a fluidní, které lze použít pro spalování téměř všech druhů uhlí. Pro nejvyšší výkony (až do 3000t/h pro bloky 1000 MWe) se používá jen spalování v práškovém ohništi. Práškové kotle obecně nejsou nijak omezeny parametry páry nebo řešením výparnickového systému.*

*Práškové kotle spalují uhelný prášek v hořácích. Palivo je rozemleto na prach o velikosti zrn desítek až stovek mikrometrů. Rozemletím uhlí dochází ke zvětšení měrného povrchu paliva až 100x, dosáhne se rychlé zapálení prášku a zajistí se intenzivnější spalování.*

*Pro mletí uhelného prášku se používají mlecí okruhy (dnes především ventilátorové, trubnaté a kladkové mlýny). V mlýnicích pak dochází i k vysušení paliva. Takto připravený prášek se do ohniště přivádí pneumaticky nosným médiem (primární směs), kterým může být vzduch, spaliny, případně jejich směs. Primární směs spolu se sekundárním vzduchem vstupuje do kotle práškovými hořáky. V prostoru ohniště pak dochází k mísení s dalším vzduchem – terciálním. Doba spalování u tohoto typu kotle se pohybuje od 0,5 do 3 sekund, zatímco na roštu bývá tato doba v desítkách minut. Spalovací vzduch je předehříván na teplotu 300-450°C.*

*Pro mletí a sušení paliva je nutné navrhnout vhodný typ mlecího okruhu (přímé foukání, pomocný zásobník) a určit způsob a stupeň vysušení paliva. Při návrhu s pomocným zásobníkem je nutné určit teplotu a množství primárního vzduchu. Volba mlýna pak závisí na melitelnosti uhlí, typu mlecího okruhu a na požadavcích na dynamické vlastnosti kotle. Volbu jemnosti mletí paliva určuje také obsah prchavých látek v hořlavině, který má vliv na mechanický nedopal. Paliva s velmi malým obsahem prchavých látek v hořlavině (např.*



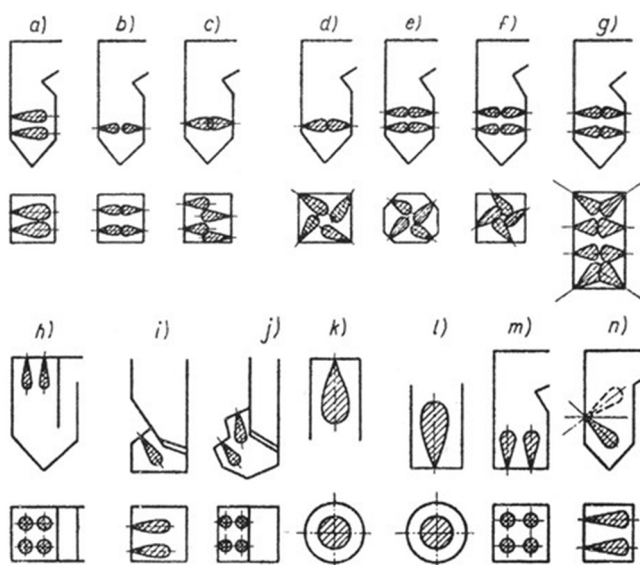
antracit) vyžadují také konstrukční úpravy spalovací komory pro zajištění zapálení a stabilního hoření paliva. Mezi tyto úpravy patří vyšší ohřátí vzduchu, zakrytí varnic na úrovni hořáků omazem, zvětšení délky plamene a tím i zvýšení spalovací komory, zvětšení přebytku vzduchu na výstupu z ohniště.

Vlastnosti paliva výrazně ovlivňují konstrukci kotle. Na mletí paliva má vliv i obsah popelovin v palivu. Větší podíl popeloviny zvyšuje měrnou spotřebu energie na mletí, zvyšuje také ztrátu mechanickým nedopalem a ztrátu fyzickým teplem tuhých zbytků.

Vlastnosti popela ovlivňují velikost spalovací komory a způsob odvodu tuhých zbytků. Nadměrný obsah vody vyžaduje vyšší teplotu vzduchu při sušení nebo použití spalin. Síra v palivu způsobuje při spalování dva velké problémy. Vytváří lepivé vrstvy na výhřevných plochách, čímž podporuje vznik nánosů. Druhým problémem je zvyšování hodnoty rosného bodu spalin, čímž podporuje korozi v ohříváku vzduchu na studeném konci.

Nevýhodou kotlů s práškovým ohništěm je zvýšení investičních nákladů (mlecí okruhy), snížení účinnosti (díky zvýšené vlastní spotřebě), znečištění spalin popílkem, které zvyšuje požadavky na následná odprašovací zařízení. Na druhou stranu tento typ spalování vykazuje menší ztráty nedopalem.

Rozeznáváme dva typy práškových kotlů, granulační se suchým odvodem tuhých zbytků a výtavná s tekutým odvodem tuhých zbytků po spalování.



Obr. 2.1. - Varianty hořáků v ohništích kotlů [7]

## 2.2. Granulační ohniště

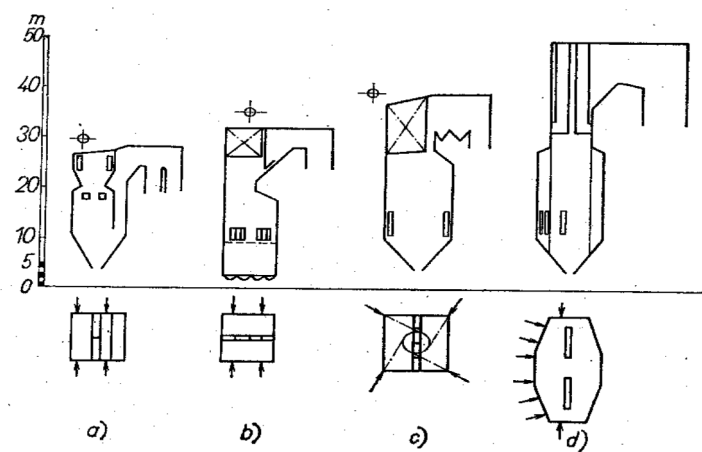
*Granulační ohniště je vhodné pro spalování méně hodnotných paliv. Podmínkou optimálního a bezporuchového provozu je udržení relativně nízké teploty tak, aby nedošlo k překročení teploty tečení popela, což vyžaduje intenzivní chlazení spalovací komory, nižší teplotu vzduchu a vhodné řízení spalovacího režimu. Při překročení teploty tečení popelovin by mohlo dojít k vytváření tekuté strusky a zastruskování ohniště.*

*Při vychlazeném ohništi vzniká z natavených částic popela tuhá škvára, která padá na dno ohniště ve tvaru výsypky. Strusková výsypka je umístěna pod celým průřezem ohniště a uzavírá jeho spodní část. Škvára, která prochází vodním uzávěrem a drtičem, se trvale odvádí mechanicky nebo hydraulicky. Ve škváře se zachytí 15-25 % popelovin z uhlí, jemná zrna popílku (75-85 % popelovin z přivedeného uhlí) jsou stržena spaliny a procházejí ohništěm přes odlučovače do komína.*

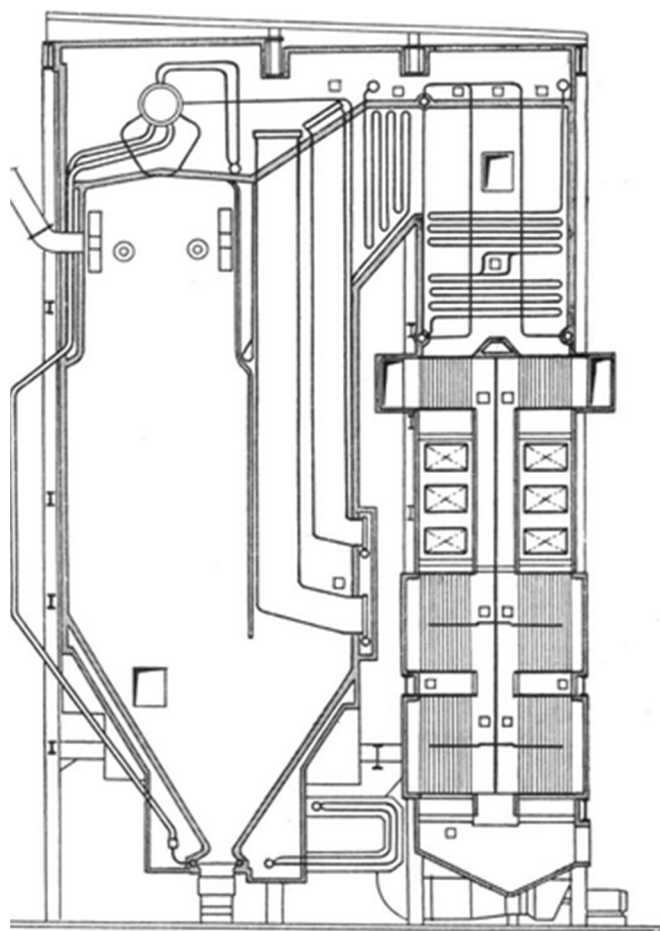
*Teplota plamene u tohoto typu ohnišť se pohybuje v závislosti na volbě paliva mezi 1100°C a 1500°C. Aby nedošlo k překročení teploty tečení popela, používá se palivo s nízkou výhřevností, vysokým podílem popelovin a vyšší vlhkostí, uvolněné teplo se pak intenzivně odvádí membránovými stěnami spalovací komory. Vzduch je předehříván na nižší teplotu nebo se volí vyšší přebytek vzduchu. Také regulací přívodu recirkulovaných spalin do ohniště je možné teplotu v ohništi usměrnit dle potřeby.*

*Granulační ohniště jsou vhodná pro spalování kvalitních i méně kvalitních paliv, paliv s vysokým obsahem vody nebo popela. Oproti výtavným ohništím je zde snazší udržování minimálních výkonností i bez stabilizačních hořáků, není zde nutná náročnější příprava uhelného prášku, protože tato ohniště jsou méně citlivá na jemnost mletí a vysušení paliva. Zanášení dodatkových výhřevných ploch je nižší než u výtavných a cyklónových ohnišť, také regulace spalovacího procesu je méně náročná.*

*Nedostatkem je velký úlet popílku a z toho vyplývající vyšší nároky na odlučovací zařízení.*



Obr.3.2. Granulační ohniště [6]



Obr.3.3. Třítahový granulační kotel s hořáky v horní části spalovací komory [7]

### 3. Stechiometrické výpočty a stanovení účinnosti kotle

Cílem stochiometrických výpočtů je určení objemu vzduchu potřebného pro spalování jednotkového množství paliva a určení objemu spalin, které při spalování vznikají. Při výpočtu se vychází z chemických reakčních rovnic (stechiometrické spalovací rovnice) a z bilance látkového množství.

Nejprve se budu zabývat garančním palivem, tedy palivem, při jehož použití musí kotel trvale dodržovat jmenovité parametry.

#### 3.1. Garanční palivo

Výpočet množství spalin:

- Výhřevnost paliva  $Q_i^r = 20,845 \text{ KJ/kg}$
- Obsah vody  $W^r = 12,3 \%$
- Obsah popela  $A^r = 21,8 \%$
- Hořlavina v surovém stavu, určena dopočtem z obsahu vody a popela  $h^r = 65,9 \%$
- Z doporučení pro počítaný kotel určíme:
  - přebytek vzduchu  $n = 1,2$
  - součinitel vlhkosti vzduchu  $v = 1,01$

Pro garanční palivo stanovíme prvkový rozbor paliva v hořlavině:

$$C^h = 85,35 \%$$

$$H^h = 3,7 \%$$

$$O^h = 9,35 \%$$

$$N^h = 0,9 \%$$

$$S^h = 0,7 \%$$

Přepočet obsahů prvků v hořlavině na surový stav

Při přepočtu postupujeme dle vzorce  $X^r = X^h \cdot (1 - A^r - W^r)$

$$C^r = 56,246 \%$$

$$H^r = 2,438 \%$$

$$O^r = 6,162 \%$$

$$N^r = 0,593 \%$$

$$S^r = 0,461 \%$$

Součet prvků hořlaviny je 65,9 %, což odpovídá předchozí dopočítané hodnotě

Výpočet výhřevnosti pomocí Dulongova vzorce:

$$Q_i^r = 33,91 \cdot C^r + 121,42 \cdot H^r - 15,18 \cdot O^r + 10,47 S^r - 2,45 W^r \quad (1)$$

$$Q_i^r = 33,91 \cdot 0,56246 + 121,42 \cdot 0,02438 - 15,18 \cdot 0,06162 + 10,47 \cdot 0,00461 - 2,45 \cdot 0,123$$

$$Q_i^r = 20,845 \text{ MJ/kg}$$

Výpočet množství spalin – stechiometrické spalování

Množství kyslíku pro spalování (objemově)

$$V_{O_2,t} = \frac{22,4}{12} \cdot C^r + \frac{22,4}{4} \cdot H^r + \frac{22,4}{32} \cdot S^r - 0,7 \cdot O_2^r \quad (2)$$

$$V_{O_2,t} = \frac{22,4}{12} \cdot 0,56246 + \frac{22,4}{4} \cdot 0,02438 + \frac{22,4}{32} \cdot 0,00461 - 0,7 \cdot 0,06162$$

$$V_{O_2,t} = \underline{1,147 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Vzduch teoretický suchý

$$V_{VZ,t}^S = \frac{1}{0,21} \cdot V_{O_2,t} \quad (3)$$

$$V_{VZ,t}^S = \frac{1}{0,21} \cdot 1,147$$

$$V_{VZ,t}^S = \underline{5,460 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Vzduch skutečný suchý

$$V_{VZ,S}^S = V_{VZ,t}^S \cdot n \quad (4)$$

$$V_{VZ,S}^S = 5,460 \cdot 1,2$$

$$V_{VZ,S}^S = \underline{6,552 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Vzduch skutečný vlhký

$$V_{VZ,S}^V = V_{VZ,S}^S \cdot v \quad (5)$$

$$V_{VZ,S}^V = 6,552 \cdot 1,01$$

$$V_{VZ,S}^V = \underline{6,617 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$



*Přebytek vzduchu – kontrola*

$$n = \frac{V_{VZ,S}^S}{V_{VZ,t}^S} \quad (6)$$

$$n = \frac{6,552}{5,460}$$

$$n = \underline{1,2}$$

*Spaliny teoretické suché*

$$V_{SP,t}^S = \frac{22,4}{12} \cdot C^r + \frac{22,4}{32} \cdot S^r + \frac{22,4}{28} \cdot N^r + 0,79 \cdot V_{VZ,t}^S \quad (7)$$

$$V_{SP,t}^S = \frac{22,4}{12} \cdot 0,56246 + \frac{22,4}{32} \cdot 0,00461 + \frac{22,4}{28} \cdot 0,00593 + 0,79 \cdot 5,460$$

$$V_{SP,t}^S = \underline{5,371 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

*Spaliny skutečné suché*

$$V_{SP,S}^S = V_{SP,t}^S + (n - 1) \cdot V_{VZ,t}^S \quad (8)$$

$$V_{SP,S}^S = 5,371 + (1,2 - 1) \cdot 5,460$$

$$V_{SP,S}^S = \underline{6,463 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

*Obsah vody ve spalínách*

$$V_{H2O} = \frac{22,4}{2} \cdot H^r + \frac{22,4}{18} \cdot w + (v - 1) \cdot V_{VZ,S}^S \quad (9)$$

$$V_{H2O} = \frac{22,4}{2} \cdot 0,02438 + \frac{22,4}{18} \cdot 0,123 + (1,01 - 1) \cdot 6,552$$

$$V_{H2O} = \underline{0,492 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

*Spaliny skutečné vlhké*

$$V_{SP,S}^V = V_{SP,S}^S + V_{H2O} \quad (10)$$

$$V_{SP,S}^V = 6,463 + 0,492$$

$$V_{SP,S}^V = \underline{6,955 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

*Obsah dusíku*

$$V_{N2} = \frac{22,4}{28} \cdot N^r + n \cdot 0,79 \cdot V_{VZ,t}^S \quad (11)$$

$$V_{N2} = \frac{22,4}{28} \cdot 0,00593 + 1,2 \cdot 0,79 \cdot 5,460$$

$$V_{N2} = \underline{5,181 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

*Obsah kyslíku*

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (n - 1) \cdot V_{VZ,t}^S \quad (12)$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (1,2 - 1) \cdot 5,460$$

$$V_{O_2} = \underline{0,229 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

*Obsah CO<sub>2</sub>*

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} \cdot C^r \quad (13)$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} \cdot 0,56246$$

$$V_{CO_2} = \underline{1,050 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

*Obsah SO<sub>2</sub>*

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32} \cdot S^r \quad (14)$$

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32} \cdot 0,00461$$

$$V_{SO_2} = \underline{0,003 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

*Koncentrace složek ve spalínách vlhkých*

*Oxid uhličitý*

$$\bar{\omega}_{CO_2} = \frac{\frac{22,4}{12} \cdot C^r}{V_{SP,S}^V} \cdot 100 \quad (15)$$

$$\bar{\omega}_{CO_2} = \frac{\frac{22,4}{12} \cdot 0,56246}{6,955} \cdot 100$$

$$\bar{\omega}_{CO_2} = \underline{15,096 \%}$$

*Oxid siřičitý*

$$\bar{\omega}_{SO_2} = \frac{\frac{22,4}{32} \cdot S^r}{V_{SP,S}^V} \cdot 100 \quad (16)$$

$$\bar{\omega}_{SO_2} = \frac{\frac{22,4}{32} \cdot 0,00461}{6,955} \cdot 100$$

$$\bar{\omega}_{SO_2} = \underline{0,046 \%}$$

*Oxidy dusíku*

$$\bar{\omega}_{NO} = \frac{\frac{22,4}{28} \cdot N^r}{V_{SP,S}^V} \cdot 100 \quad (17)$$

$$\bar{\omega}_{NO} = \frac{\frac{22,4}{28} \cdot 0,00593}{6,955} \cdot 100$$

$$\bar{\omega}_{NO} = \underline{0,000 \%}$$

*Kyslík*

$$\bar{\omega}_O = \frac{0,21 \cdot (n-1) \cdot V_{VZ,t}^S}{V_{SP,S}^V} \cdot 100 \quad (18)$$

$$\bar{\omega}_O = \frac{0,21 \cdot (1,2 - 1) \cdot 5,460}{6,955} \cdot 100$$

$$\bar{\omega}_O = \underline{3,297 \%}$$

*Obsah vody*

$$\bar{\omega}_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{SP,S}^V} \cdot 100 \quad (19)$$

$$\bar{\omega}_{H_2O} = \frac{0,0492}{6,955} \cdot 100$$

$$\bar{\omega}_{H_2O} = \underline{7,070 \%}$$

*Dusík*

$$\bar{\omega}_{N_2} = \frac{\frac{22,4}{28} \cdot N^r + n \cdot 0,79 \cdot V_{VZ,t}^S}{V_{SP,S}^V} \cdot 100 \quad (20)$$

$$\bar{\omega}_{N_2} = \frac{\frac{22,4}{28} \cdot 0,00593 + 1,2 \cdot 0,79 \cdot 5,460}{6,955} \cdot 100$$

$$\bar{\omega}_{N_2} = \underline{74,490 \%}$$

*SUMA*

$$\Sigma = \bar{\omega}_{CO_2} + \bar{\omega}_{SO_2} + \bar{\omega}_{NO} + \bar{\omega}_O + \bar{\omega}_{H_2O} + \bar{\omega}_{N_2} \quad (21)$$

$$\Sigma = 15,096 + 0,046 + 0,000 + 3,297 + 7,070 + 74,490$$

$$\Sigma = \underline{100 \%}$$

*Koncentrace složek ve spalínách suchých*

*Oxid uhličitý*

$$\bar{\omega}_{CO_2} = \frac{\frac{22,4}{12} \cdot C^r}{V_{SP,S}^S} \cdot 100 \quad (22)$$

$$\bar{\omega}_{CO_2} = \frac{\frac{22,4}{12} \cdot 0,56246}{6,463} \cdot 100$$

$$\bar{\omega}_{CO_2} = \underline{16,245 \%}$$

*Oxid siřičitý*

$$\bar{\omega}_{SO_2} = \frac{\frac{22,4}{32} \cdot S^r}{V_{SP,S}^S} \cdot 100 \quad (23)$$

$$\bar{\omega}_{SO_2} = \frac{\frac{22,4}{32} \cdot 0,00461}{6,463} \cdot 100$$

$$\bar{\omega}_{SO_2} = \underline{0,050 \%}$$

*Oxidy dusíku*

$$\bar{\omega}_{NO} = \frac{\frac{22,4}{28} N^r}{V_{SP,S}^S} \cdot 100 \quad (24)$$

$$\bar{\omega}_{NO} = \frac{\frac{22,4}{28} \cdot 0,00593}{6,463} \cdot 100$$

$$\bar{\omega}_{NO} = \underline{0,000 \%}$$

*Kyslík*

$$\bar{\omega}_O = \frac{0,21 \cdot (n-1) \cdot V_{Z,t}^S}{V_{SP,S}^S} \cdot 100 \quad (25)$$

$$\bar{\omega}_O = \frac{0,21 \cdot (1,2 - 1) \cdot 5,460}{6,463} \cdot 100$$

$$\bar{\omega}_O = \underline{3,548 \%}$$

*Dusík*

$$\bar{\omega}_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{SP,S}^S} \cdot 100 \quad (26)$$

$$\bar{\omega}_{N_2} = \frac{5,181}{6,463} \cdot 100$$

$$\bar{\omega}_{N_2} = \underline{80,157 \%}$$

*SUMA*

$$\Sigma = \bar{\omega}_{CO_2} + \bar{\omega}_{SO_2} + \bar{\omega}_{NO} + \bar{\omega}_O + \bar{\omega}_{N_2} \quad (27)$$

$$\Sigma = 16,245 + 0,050 + 0,000 + 3,548 + 80,157$$

$$\Sigma = \underline{100 \%}$$

### **Výpočet účinnosti kotle**

*Již při návrhu kotle je nutné předem odhadnout velikost jednotlivých tepelných ztrát. V úvahu přicházejí tyto základní ztráty: ztráta mechanickým nedopalem, ztráta chemickým nedopalem, ztráta sáláním a vedením tepla do okolí, ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků a ztráta citelným teplem spalin (komínová).*

### Ztráta mechanickým nedopalem

Tato ztráta představuje nespálenou hořlavinu v tuhých zbytcích.

Podíl popílku ve škváře a strusce

$$C_S = 0,04$$

Bilance popela – podíl popela ve škváře

$$X_S = 0,1$$

Výhřevnost hořlaviny v tuhých zbytcích

$$Q_{ci} = 32,6 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Ztráta ve škváře

$$Z_{CS} = \frac{C_S}{1-C_S} \cdot X_S \cdot \frac{A^r}{Q_{i \text{ red}}} \cdot Q_{ci} \quad (28)$$

$$Z_{CS} = \frac{0,04}{1-0,04} \cdot 0,1 \cdot \frac{0,218}{20,845} \cdot 32,6$$

$$Z_{CS} = \underline{0,142 \%}$$

Podíl uhlíku v úletu

$$C_{\dot{U}} = 0,1$$

Bilance popela – podíl popela v úletu

$$X_{\dot{U}} = 0,85$$

Výhřevnost hořlaviny v tuhých zbytcích

$$Q_{ci} = 32,6 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Ztráta v úletu

$$Z_{C\dot{U}} = \frac{C_{\dot{U}}}{1-C_{\dot{U}}} \cdot X_{\dot{U}} \cdot \frac{A^r}{Q_{i \text{ red}}} \cdot Q_{ci} \quad (29)$$

$$Z_{C\dot{U}} = \frac{0,1}{1-0,1} \cdot 0,85 \cdot \frac{0,218}{20,845} \cdot 32,6$$

$$Z_{C\dot{U}} = \underline{3,220 \%}$$

Celková ztráta mechanickým nedopalem

$$Z_C = Z_{CS} + Z_{C\dot{U}} \quad (30)$$

$$Z_C = 0,142 + 3,220$$

$$Z_C = \underline{3,362 \%}$$



### Ztráta chemickým nedopalem

Tato ztráta hořlavinou ve spalínách vyjadřuje teplo ztracené v důsledku přítomnosti nespálených plynů ve spalínách. Obvykle se pro její určení zjišťuje pouze koncentrace CO ve spalínách, při spalování dřeva a plynu někdy i koncentrace methanu.

*Ztráta chemickým nedopalem*

$$Z_{CO} = 0,5 \%$$

### Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí

Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí zohledňuje množství tepla, které uniká pláštěm kotle a závisí na kvalitě izolace stěn, způsobu oplechování, velikosti povrchu a výkonu kotle. Pro předběžný odhad se nahrazuje velikost povrchu kotle jeho jmenovitým parním výkonem. Tato ztráta se při výpočtu dělí na dílčí ztráty (ohniště, přehříváky, přihříváky, EKO a ohřívák vzduchu). Velikost ztráty je téměř nezávislá na výkonu kotle, protože teplota povrchu pláště se s výkonem mění jen málo.

*Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí odečtena z grafu.*

$$Z_{SV} = 0,5 \%$$

### Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků $Z_f$

*Tato ztráta se skládá ze ztráty ve škváře, strusce, popílku, úletu a propadu.*

*Podíl uhlíku ve škváře a strusce*

$$C_S = 0,04$$

*Bilance popela – podíl popela ve škváře*

$$X_S = 0,1$$

*Výhřevnost hořlaviny v tuhých zbytcích*

$$Q_{ci} = 32,6 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

*Měrná tepelná kapacita tuhých zbytků*

$$c_S = 0,9301 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

*Teplota tuhých zbytků*

$$t_S = 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

*Ztráta ve škváře*

$$Z_{fs} = \frac{X_S}{1-C_S} \cdot \frac{A_r}{Q_i^r \cdot 1000} \cdot c_S \cdot t_S \quad (31)$$

$$Z_{fs} = \frac{0,1}{1 - 0,04} \cdot \frac{0,218}{20,845 \cdot 1000} \cdot 0,9301 \cdot 600$$

$$Z_{fs} = \underline{0,061 \%}$$

*Podíl uhlíku v úletu*

$$C_{\dot{u}} = 0,1$$

*Bilance popela – podíl popela v úletu*

$$X_{\dot{u}} = 0,85$$

*Výhřevnost hořlaviny v tuhých zbytcích*

$$Q_{ci} = 32,6 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

*Měrná tepelná kapacita tuhých zbytků*

$$c_{\dot{u}} = 0,8221 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

*Teplota tuhých zbytků*

$$t_{\dot{u}} = 140 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

*Ztráta fyzickým teplem v úletu*

$$Z_{f\dot{u}} = \frac{X_{\dot{u}}}{1 - C_{\dot{u}}} \cdot \frac{A_r}{Q_i^r \cdot 1000} \cdot c_{\dot{u}} \cdot t_{\dot{u}} \quad (32)$$

$$Z_{f\dot{u}} = \frac{0,85}{1 - 0,1} \cdot \frac{0,218}{20,845 \cdot 1000} \cdot 0,8221 \cdot 140$$

$$Z_{f\dot{u}} = \underline{0,114 \%}$$

*Celková ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků*

$$Z_f = Z_{f\dot{u}} + Z_{fs} \quad (33)$$

$$Z_f = 0,114 + 0,061$$

$$Z_f = \underline{0,174 \%}$$

*Ztráta citelným teplem spalin*

*Komínová ztráta představuje teplo odcházející z kotle v kouřových plynech, jedná se o nejvýznamnější ztrátu, která nejvíce ovlivňuje výslednou účinnost kotle. Velikost této ztráty je určena teplotou spalin a přebytkem vzduchu ve spalinách za kotlem.*

*Entalpie spalin při teplotě  $t_k$*

$$i_s = i_{s,min}^t + (n - 1) \cdot i_{VZ,min}^t \quad (34)$$

$$i_s = 1304,807 + (1,2 - 1) \cdot 144,332$$

$$i_s = \underline{1333,673 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

*Entalpie spalín  $s_{min}$*

$$i_{s,min}^t = V_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + V_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + V_{N_2} \cdot i_{N_2} + V_{H_2O} \cdot i_{H_2O} + a_{\dot{u}} \frac{A^r}{100} \cdot i_r \quad (35)$$

$$i_{s,min}^t = 1,050 \cdot 245 + 0,003 \cdot 272,36 + 5,181 \cdot 181,66 + 0,492 \cdot 212,16 \\ + 0,85 \frac{0,218}{100} \cdot 116,24$$

$$i_{s,min}^t = \underline{1304,807 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

*Entalpie minimálního množství vzduchu nasávaného*

$$i_{VZ,min}^t = V_{VZ,t}^S \cdot i_{VZ,t=20} + V_{H_2O}^{VZ} \cdot i_{H_2O,t} \quad (36)$$

$$i_{VZ,min}^t = 5,460 \cdot 26,06 + 0,066 \cdot 31,28$$

$$i_{VZ,min}^t = \underline{144,332 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

*Entalpie při 140°C*

$$CO_2 \quad i_{CO_2} = 245 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$SO_2 \quad i_{SO_2} = 272,36 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$N_2 \quad i_{N_2} = 181,66 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$H_2O \quad i_{H_2O} = 212,16 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\text{Popílek} \quad i_{pop} = 116,24 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\text{Podíl popílku v úletu} \quad a_{\dot{u}} = 0,85$$

$$\text{Entalpie vzduchu při teplotě 20°C} \quad i_{VZ,t=20} = 26,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\text{Entalpie vody při teplotě 20°C} \quad i_{H_2O,t=20} = 31,28 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\text{Obsah vody ve vzduchu} \quad V_{H_2O}^{VZ} = 0,066 \text{ m}_N^3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

*Komínová ztráta*

$$Z_k = \frac{\left(1 - \frac{Z_C}{100}\right) \cdot (i_s - n \cdot i_{VZ,min}^t)}{Q_i^r \cdot 1000} \cdot 100 \quad (37)$$

$$Z_k = \frac{\left(1 - \frac{0,03362}{100}\right) \cdot (1333,673 - 1,2 \cdot 144,322)}{20,845 \cdot 1000} \cdot 100$$

$$Z_k = \underline{5,380 \%}$$

Celková ztráta kotle

$$Z = Z_c + Z_{co} + Z_{sv} + Z_f + Z_k \quad (38)$$

$$Z = 3,62 + 0,5 + 0,5 + 0,174 + 5,380$$

$$Z = \underline{9,916 \%}$$

Účinnost kotle

$$\eta_k = 100 - Z \quad (39)$$

$$\eta_k = 100 - 9,916$$

$$\eta_k = \underline{90,084 \%}$$

## 4. Rosný bod spalín

*Pro dodržení optimální účinnosti kotle je rozhodující spolu s množstvím spalín jejich teplota. Teplotu spalín za kotlem nelze volit jen z hlediska dosažení maximální účinnosti, ale její hodnota souvisí i s konstrukcí kotle (přítomnost či nepřítomnost spalínového ohříváku vzduchu) a druhem spalovaného paliva (obsah síry).*

*Při spalování fosilních paliv obsahujících síru vzniká jejich oxidací ve spalovací komoře téměř výhradně  $\text{SO}_2$  a až při ochlazování spalín, přibližně pod  $600^\circ\text{C}$ , se v závislosti na přebytku spalovacího vzduchu velmi malá část  $\text{SO}_2$  oxiduje na  $\text{SO}_3$ , který při dalším ochlazení spalín pod  $200^\circ\text{C}$  vytváří s vodní parou ve spalínách téměř okamžitě plynnou  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . S dalším ochlazováním spalín plynná  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a vodní pára kondenzují a vytvářejí roztok kondenzátu  $\text{H}_2\text{O} / \text{H}_2\text{SO}_4$ . Proto všechny části zařízení od poslední teplosměnné plochy kotle až po komín, tedy pokud není přítomno odsiřování spalín hned za kotlem nebo za EO, které mají teplotu stěny nižší než je rosný bod směsi  $\text{H}_2\text{O} / \text{H}_2\text{SO}_4$ , budou napadeny korozí. Pro zajištění ochrany celého zařízení před korozí se musí udržovat teplota spalín za kotlem o potřebnou hodnotu vyšší než rosný bod spalín a současně zajistit, aby teplota stěny poslední teplosměnné plochy byla alespoň na úrovni rosného bodu spalín (Obr. 3.4).*

*Teplota spalín za kotlem není konstantní a mění se při změně parametrů spalovaného paliva, při čištění teplosměnných ploch kotle a při změně výkonu.*

*I když by měla být teplota spalín co nejnižší, nesmí klesnout pod rosný bod spalín, protože pak by se chladnější výhřevné plochy (vstupní díly ohříváku vzduchu a ekonomizéru) zalepovaly popílkem a docházelo by ke korozi. Obecně jsou doporučené hodnoty  $t_k$  u práškových kotlů cca  $130^\circ\text{C}$  a u roštových kotlů bývají vyšší (vyšší hodnoty platí pro paliva s větším obsahem vody a síry).*

*Při spalování uhlí musíme vždy počítat s přítomností síry. Síru zde rozlišujeme pyritovou, síranovou, siřníkovou a organickou. První tři zmíněné formy jsou obsaženy v popelovinách, poslední zmíněná forma je vázána v organických sloučeninách a stanovuje se jako rozdíl veškeré síry v palivu a součtu prvních tří zmíněných forem.*

*Při spalování uhlí zůstává v tuhých zbytcích po spalování síra síranová. Síra organická, stejně jako síra obsažená v sulfidech, shoří na  $\text{SO}_2$ . Tyto formy síry bývají označovány jako síra spalitelná nebo prchavá.*

*Koncentrace síry v uhlí je poměrně vysoká, ale procento koncentrace není charakteristické ani pro uhelné pánve, ani pro jednotlivé doly či lokality.*



*Síra v uhlí výrazně ovlivňuje chemické reakce, které za vhodných podmínek probíhají mezi složkami popelovin a teplosměnnou plochou kotle, stejně jako mezi složkami spalín a teplosměnnými plochami. Síra tedy velmi úzce souvisí s tvorbou struskových a popílkových nánosů a s korozí na straně spalín. Nadměrná koncentrace popílku ve spalínách a také nevhodné mineralogické složení popela vede k velké abrazi teplosměnných ploch kotle a ke snížení jejich provozní spolehlivosti.*

*Při spalování uhlí s obsahem síry vzniká kromě vysokoteplotní koroze i nízkoteplotní koroze. Vysokoteplotní koroze se vyskytují na trubkových stěnách ohniště a v oblasti přehříváku. Příčinou je redukční atmosféra s obsahem CO a H<sub>2</sub> a se zvýšeným obsahem nespálených látek a i nepatrným obsahem sirovodíku. Intenzita je závislá na složení a vlastnostech plynného prostředí a na složení a stavu slinutých nánosů na trubkách a na stavu ochranné vrstvy oxidů. Při spalování hnědého uhlí se vysokoteplotní koroze neprojevuje tak často a v takové intenzitě jako při spalování uhlí s malým obsahem prchavé hořlaviny. Vysokoteplotní koroze se vyskytuje hlavně u olejových kotlů, kde se podílí na této korozi přítomný vanad.*

*Nízkoteplotní koroze vznikají tam, kde na materiál kotle mohou působit kondenzující složky spalín, tedy u teplosměnných ploch, vyzdívek, izolací, částí ocelových konstrukcí a plechových kanálů. Složky spalín, jako jsou například, SO<sub>3</sub>, HCl, s vodní parou obsaženou ve spalínách při určité teplotě a za dalších podmínek vytvářejí kyseliny, jejichž páry při ochlazení na teplotu nižší než je jejich rosný bod (při parciálním tlaku) kondenzují a tím vzniká agresivní kondenzát, který napadá materiály kotle. Účinek této koroze je závislý na koncentraci korozetvorných složek a na pracovních podmínkách provozovaného zařízení (na teplotě, přebytku vzduchu, fyzikálních a chemických vlastnostech popílku ve spalínách). Tato koroze vzniká v místech, kde teplota povrchu stěny a mezní vrstvy v její blízkosti klesne pod teplotu kondenzace vodní páry nebo par kyseliny sírové při daném parciálním tlaku.*

*Teplota rosného bodu vodní páry ve spalínách je závislá na přebytku vzduchu a na obsahu vody ve spalínách. (Obr.3.5. a 3.6.) Za přítomnosti par kyseliny sírové ve spalínách je parciální tlak kyseliny sírové úměrný obsahu SO<sub>3</sub> ve spalínách a ten vzrůstá s rostoucím obsahem síry v palivu a se zvětšujícím se obsahem kyslíku ve spalínách. Při zvýšeném přebytku vzduchu se tvoří SO<sub>3</sub> jak přímo, tak i další oxidací SO<sub>2</sub>.*

*Součinitel této konverze (oxidace) se určí následovně:  $\varphi_{\text{SO}_3} = 100 \frac{\omega_{\text{SO}_3}}{\omega_{\text{SO}_2} + \omega_{\text{SO}_3}} [\%]$ .*

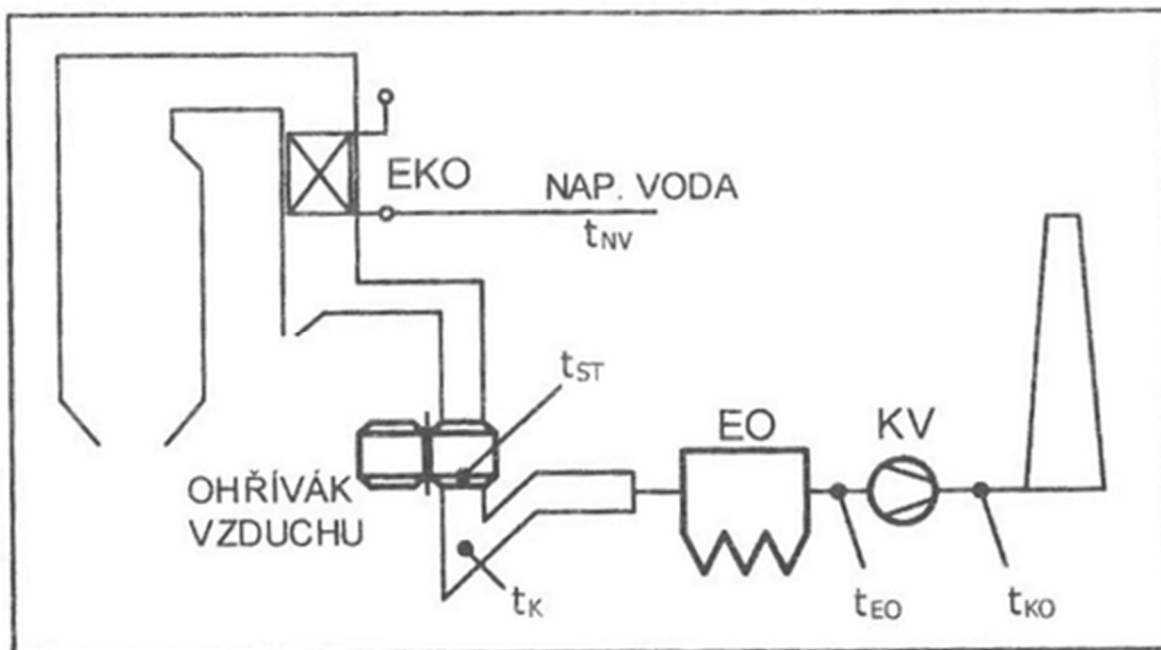
*$\omega_{\text{SO}_2}$  a  $\omega_{\text{SO}_3}$  jsou objemové podíly složek ve spalínách. Hodnota součinitele konverze se u práškových ohnišť pohybuje okolo 1-2 %.*

Nejzávažnějším faktorem pro vznik a působení nízkoteplotní koroze je teplota. Korozní účinek při dosažení teploty rosného bodu směsi  $H_2O + H_2SO_4$  je velmi malý, protože množství vzniklého kondenzátu je malé. Při poklesu teploty stěny pod teplotu rosného bodu o 20 – 40 K nastává první maximum, vzniká značné množství kondenzátu. Kromě množství kondenzátu je intenzita koroze závislá i na koncentraci kyseliny, druhé maximum je tedy v oblasti teplot kondenzace (asi 40°C), kdy se koncentrace  $H_2SO_4$  pohybuje okolo 20-40%.

K velmi silné korozi dochází při odstavování a najíždění, kdy dochází k opakovanému přecházení prvního maxima. První maximum leží v oblasti teplot nižších o 20 – 40 K než je teplota rosného bodu směsi  $H_2O + H_2SO_4$ . Při dalším snížení teploty stěny rychlost koroze klesá, až dosáhne svého minima. Při dalším poklesu teploty stěny rychlost koroze opět vzrůstá a svého druhého maxima, které je vyšší než první, dosahuje při poklesu teploty stěny do oblasti teploty kondenzace vodní páry ve spalínách, při teplotě asi 40°C.

Při spalování uhlí jsou nízkoteplotní koroze zcela běžným jevem. Již při konstrukci kotle lze omezit rozsah a zmenšit účinek této koroze. Teoreticky se lze zaměřit na odstranění příčin vzniku této koroze (hlavně snížením obsahu  $SO_3$  ve spalínách), v technické praxi se zaměřujeme na omezení těchto účinků (volbou vhodného materiálu pro teplosměnné plochy a především zajištěním provozní teploty povrchu teplosměnných ploch nad rosným bodem).

U tohoto kotle byl stanoven rosný bod spalín na teplotu 110°C. Přímo za kotlem je teplota rosného bodu 120°C, uvažujeme 10°C na ochlazení v kanálu až po odsíření.



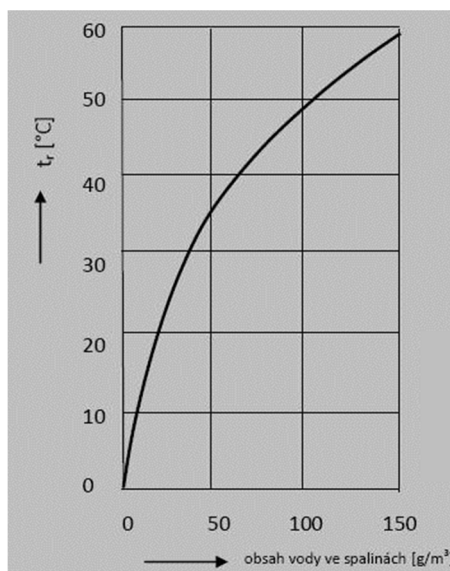
$t_{ST}$  – teplota stěny poslední teplosměnné plochy

$t_K$  – teplota spalin za kotlem

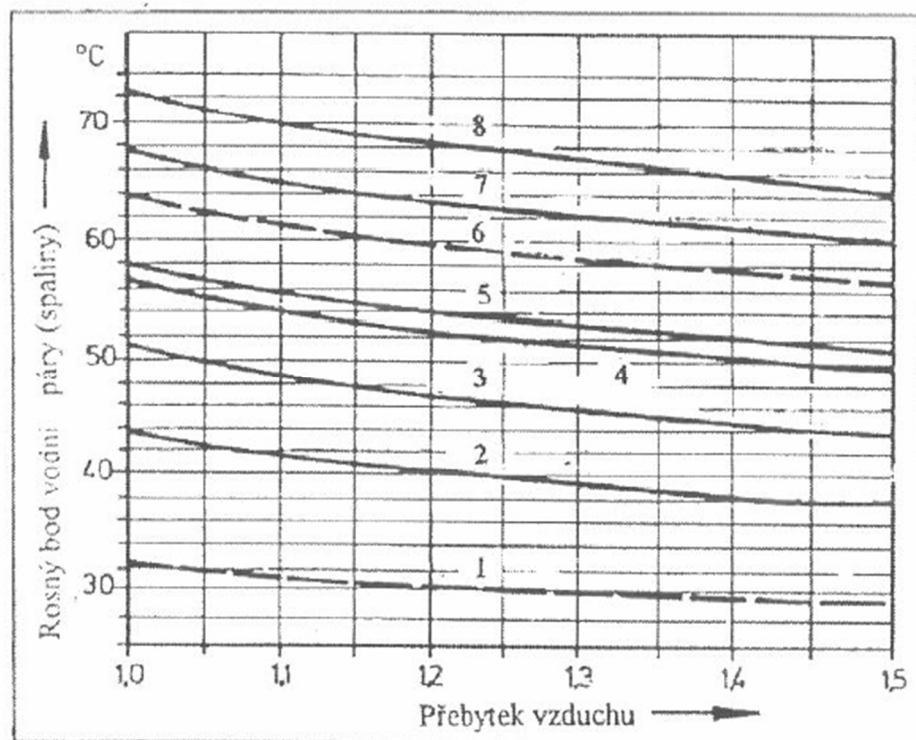
$t_{EO}$  – teplota spalin za EO

$t_{KO}$  – teplota spalin před komínem

**Obr. 4.1 – Teplotní poměry v partii za kotlem [1]**



**Obr. 4.2 - Vliv obsahu vody na teplotu rosného bodu páry ve spalinách [5]**



- 1) Vysokopecní plyn
- 2) černé uhlí
- 3) sušené hnědé uhlí ( $W = 15\%$ )
- 4) rašelina
- 5) dřevo
- 6) koksárenský plyn
- 7) středoněmecké hnědé uhlí ( $W = 50\%$ )
- 8) rýnské hnědé uhlí ( $W = 60\%$ )

Obr. 4.3 – Vliv obsahu vody a přebytku vzduchu na teplotu rosného bodu a vodní páry ve spalínách [5]

## 5. Možnosti pro zvýšení účinnosti

*Na elektroteplárně Skawina, na základě literatury, kterou máme k dispozici, lze diskutovat o těchto úpravách a provedeních, které vedou k vyšší efektivitě. K dispozici máme dvě možnosti zvýšení efektivit, a to:*

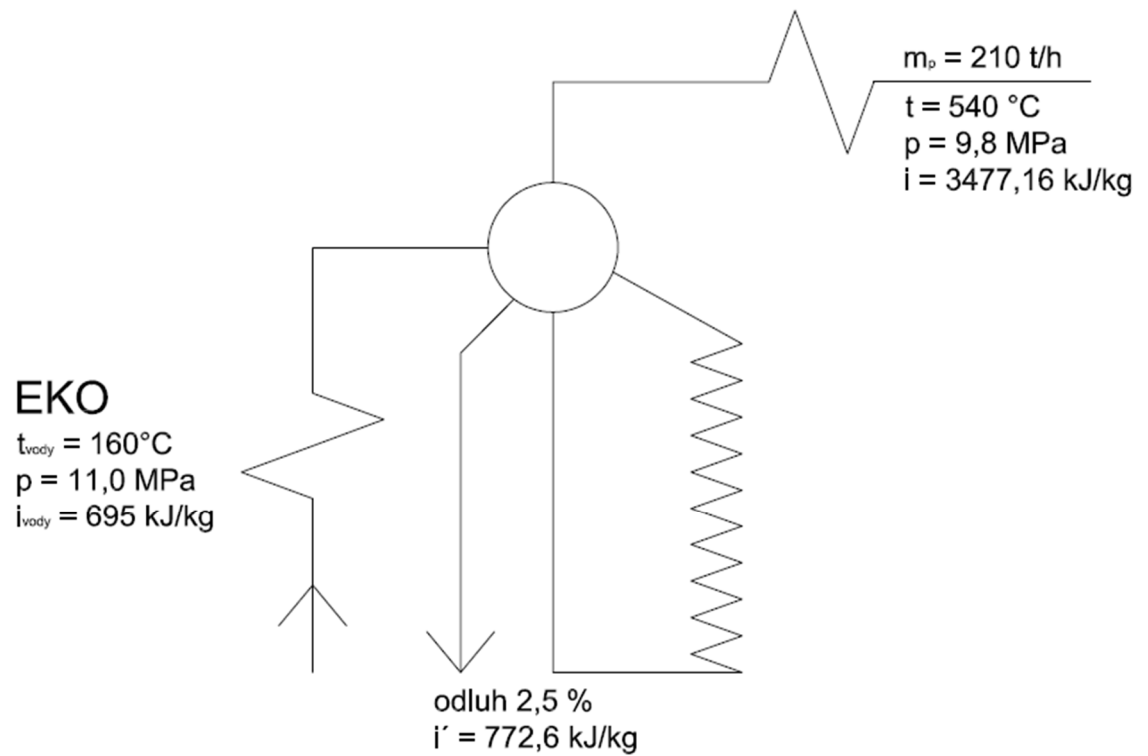
- 1) Využití dalšího snížení teploty spalin za kotlem ke zvýšení účinnosti kotle, to znamená ohřívat spalovací vzduch. Zde jsou také dvě možnosti, a to ohřívat primární vzduch nebo sekundární vzduch.*
- 2) Využít teplo ve spalinách dalším ochlazení spalin pro předehřev vratné oběhové vody z Krakova (nesouvisí s účinností kotle, ale zvyšuje účinnost teplárny)*

## 6. Výpočtový projekt vybraného řešení pro zvýšení účinnosti

*Po konzultaci s vedoucím práce se budu zabývat první možností využití tepla spalin za kotlem pro předehřev vzduchu. Jak ze schématu vyplývá, tak je použita mlýnice s trubnatými mlýny s nepřímým foukáním a brýdy se spalují v brýdových hořácích. Vycházela jsem z běžné praxe v ČR kdy by bylo možné pro ohřev použít celkový primární vzduch, který se používá jako dopravní vzduch (pro prášek) včetně dalších částí primárního vzduchu. Jak ze schématu vyplývá, na elektrárně Skawina se přivádí vzduch do hořáků až za ohřívákem vzduchu, jako studený se přivádí jen vzduch pro pneumatickou dopravu prášku ze zásobárny prášku. Množství dopravního vzduchu je tak malé, že alternativa s předehřevem dopravního vzduchu nepřichází v úvahu.*

*Druhou možností je použít teplo odchozích spalin za stávajícím ohřívákem vzduchu k většímu ohřátí veškerého vzduchu, který jde přes LUVU (primární i sekundární vzduch). Jak je z výkresu patrné z dispozičního umístění kotle je prostor pod stávajícím ohřívákem vzduchu stísněný, nemůžeme tedy přídatný ohřívák vzduchu dimenzovat dle zvolené teploty spalin za kotlem a k potřebným tepelným výkonům navrhnout odpovídající ohřívák vzduchu, ale musíme postupovat opačně – za kotel zabudovat ohřívák vzduchu o takové velikosti, která se do daného prostoru vejde a podle jeho výkonu spočítat o kolik se ochladí spaliny a ohřeje vzduch.*

### Stanovení výrobního tepla kotle



### Množství vody do kotle

$$\dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_p + \dot{m}_o \quad (40)$$

$$\dot{m}_{H_2O} = 58,33 + 1,4582$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \underline{59,7882 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}}$$

$$Q_t = \dot{m}_p \cdot i_p - \dot{m}_{H_2O} \cdot i_{H_2O} + \dot{m}_o \cdot i_o \quad (41)$$

$$Q_t = 58,33 \cdot 3477,16 - (58,33 + 1,4582) \cdot 695 + 1,17 \cdot 772,6$$

$$Q_t = \underline{162396,5 \text{ kW} = 162,4 \text{ MW}}$$

### Množství paliva

$$m_{\text{pal přivedeného}} = \frac{Q_t}{Q_i^r \cdot \eta_k} \quad (42)$$

$$m_{\text{pal přivedeného}} = \frac{162,4}{20,845 \cdot 0,90084}$$

$$m_{\text{pal přivedeného}} = \underline{8,648 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}}$$

### Skutečné množství paliva

$$m_{\text{pal skutečného}} = m_{\text{pal přivedeného}} \cdot (1 - z_c) \quad (43)$$

$$m_{\text{pal skutečného}} = 8,648 \cdot (1 - 0,0336)$$

$$m_{pal\ skutečného} = \underline{8,357\ kg \cdot s^{-1}}$$

Objem spalin

$$V_{SP,N} = m_{pal\ skutečného} \cdot V_{spal,SK}^V \quad (44)$$

$$V_{SP,N} = 8,357 \cdot 6,955$$

$$V_{SP,N} = \underline{58,123\ m_N^3 \cdot s^{-1}}$$

*Přepočet na teplotu (pro teplotu 150 °C)*

$$V_{SP,efektiv} = V_{SP,N} \cdot \frac{273,15+t}{273,15} \quad (45)$$

$$V_{SP,efektiv} = 58,123 \cdot \frac{273,15+150}{273,15}$$

$$V_{SP,efektiv} = \underline{90,041\ m^3 \cdot s^{-1}}$$

Množství vzduchu skutečného vlhkého

$$V_{VZ,SK}^V = 6,617\ m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

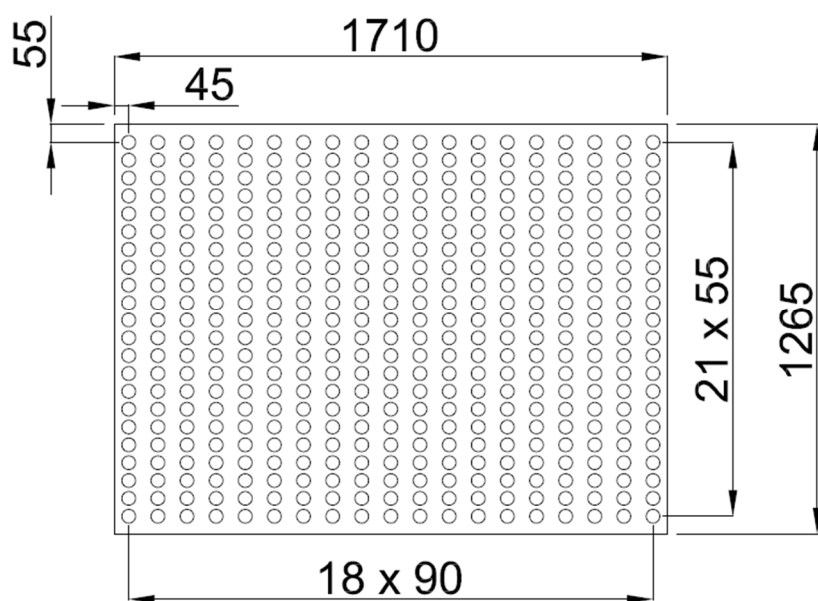
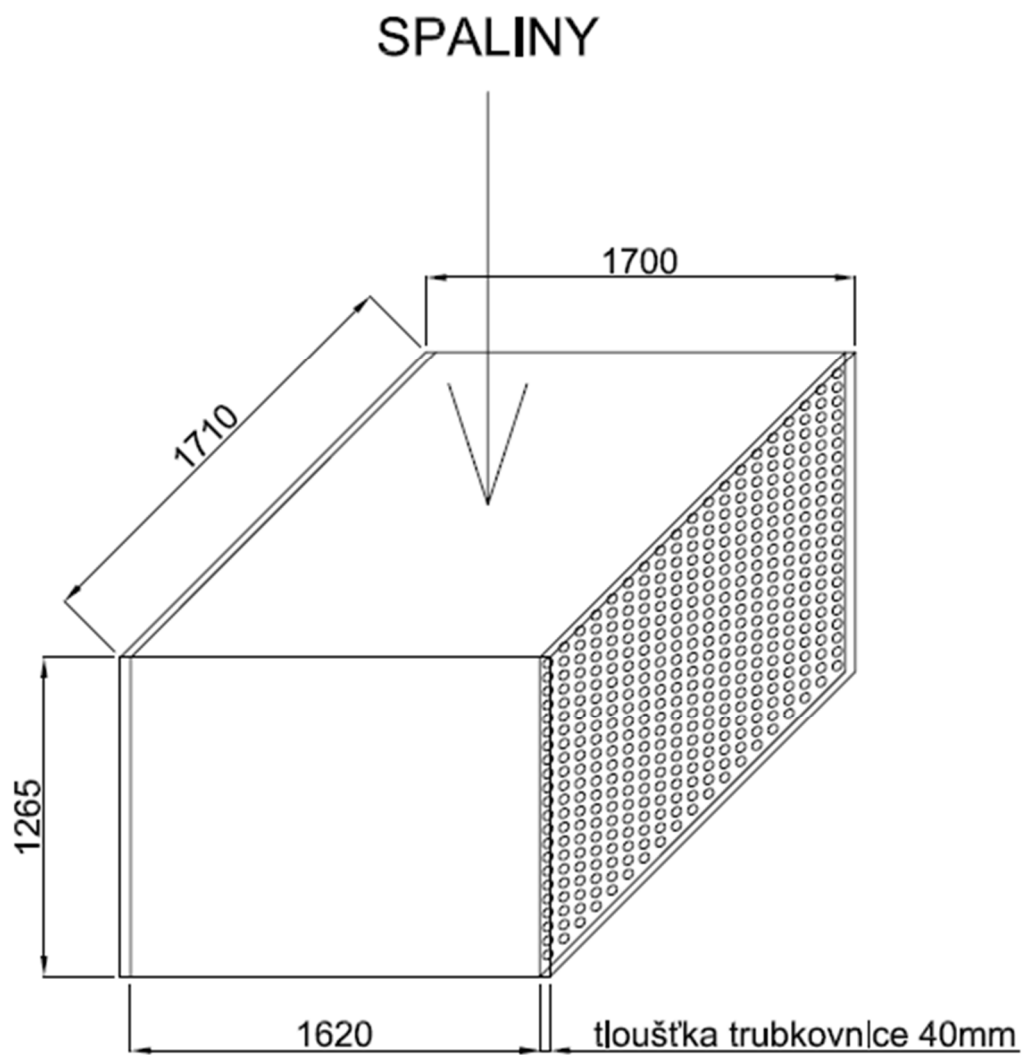
*Přepočet na teplotu (pro teplotu 50 °C)*

$$V_{VZ,efektiv} = V_{VZ,SK}^V \cdot \frac{273,15+t}{273,15} \quad (46)$$

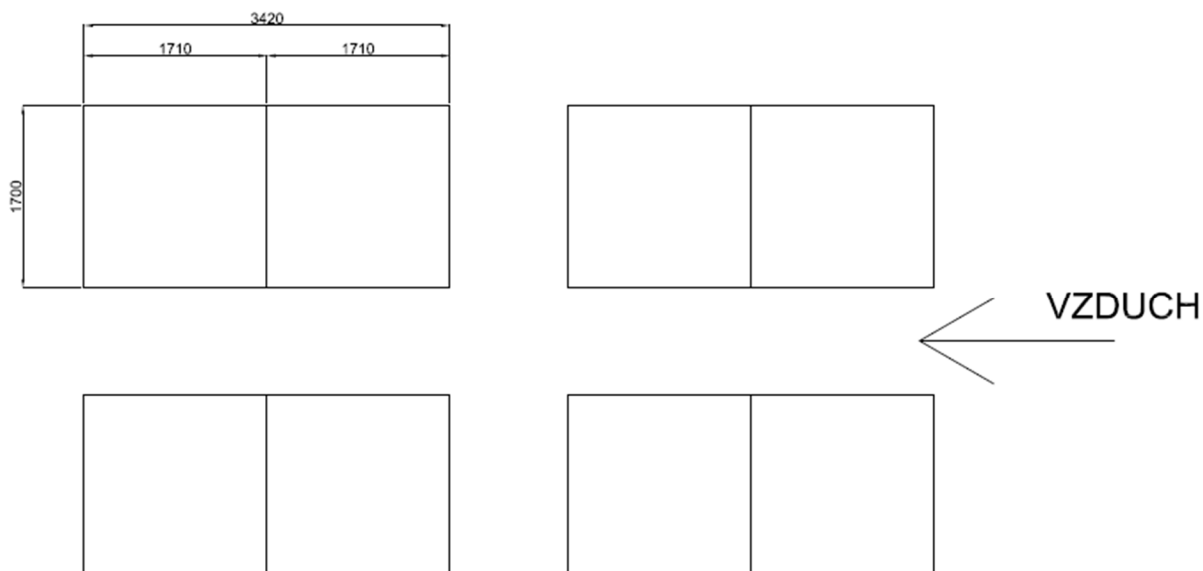
$$V_{VZ,efektiv} = 6,617 \cdot \frac{273,15+50}{273,15}$$

$$V_{VZ,efektiv} = \underline{7,828\ m^3 \cdot s^{-1}}$$





*Na kotli jsou 2 x 4 bloky, 19 x 22 trubek.*



Nyní bude cílem spočítat  $\alpha$  na straně vzduchu.

Z předchozích nákresů je patrné, že počet trubek v ohřívačku vzduchu je:

Počet trubek

$$n_{trubek} = 19 \cdot 22 \cdot 2 \cdot 4 \quad (47)$$

$$n_{trubek} = \underline{3344}$$

Vnitřní průměr trubky

$$d_{vnitř} = d_{vněj} - 2 \cdot l_{stěna} \quad (48)$$

$$d_{vnitř} = 42,4 - 2 \cdot 2,6$$

$$d_{vnitř} = \underline{37,2 \text{ mm}}$$

Vnitřní průřez trubky

$$S_{vnitř} = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad (49)$$

$$S_{vnitř} = \pi \cdot \frac{37,2^2}{4}$$

$$S_{vnitř} = \underline{1086,3 \text{ mm}^2 = 1,086 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2}$$

Celkový průtočný průměr pro vzduch

$$S_{VZ,průtok} = S_{vnitř} \cdot n_{trubek} \quad (50)$$

$$S_{VZ,průtok} = 1,086 \cdot 10^{-3} \cdot 3344$$

$$S_{VZ,průtok} = \underline{3,631 \text{ m}^2}$$

Rychlost vzduchu na vstupu (při teplotě 50 °C)

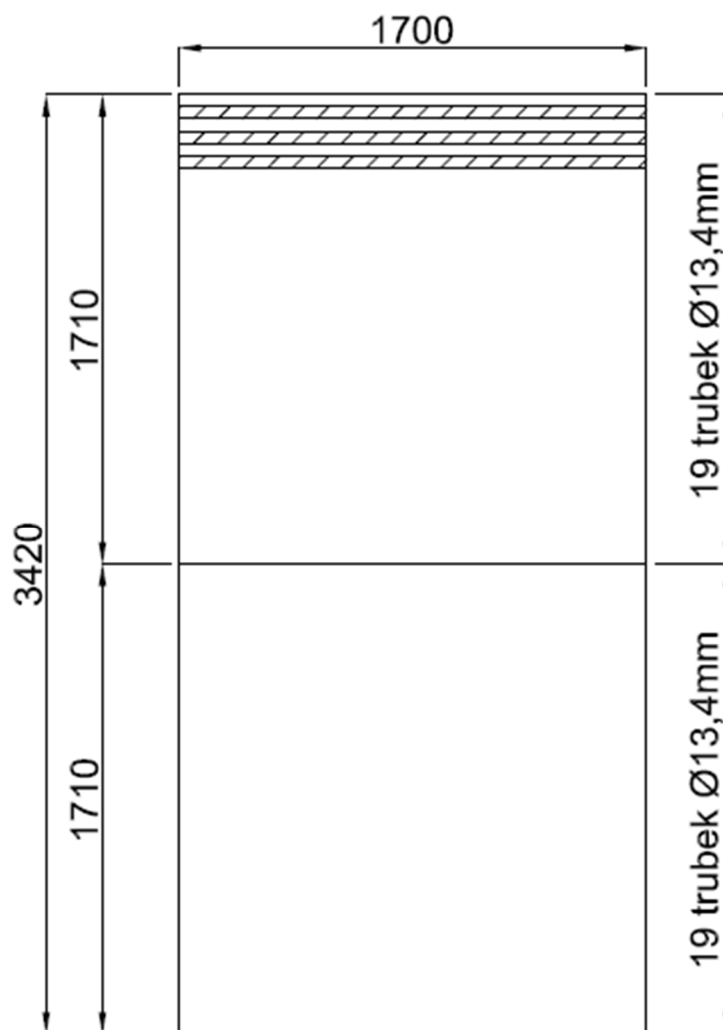
$$v = \frac{V_{VZ,efektiv}}{S_{VZ,průtok}} \quad (51)$$

$$v = \frac{7,828}{3,631}$$

$$v = \underline{2,156 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}$$

Rychlost spalin (v jedné řadě)

Rozměr kanálu



$$S_{kanálu} = \check{s}_{bloku} \cdot v_{bloku} - \check{s}_{bloku} \cdot d_{trub} \cdot n_{trubek} \cdot n_{bloků} \quad (52)$$

$$S_{kanálu} = 1,7 \cdot 3,42 - 1,7 \cdot 0,0424 \cdot 19 \cdot 2$$

$$S_{kanálu} = \underline{3,075 \text{ m}^2}$$

Tento rozměr kanálu bereme jako průtočný průřez pro spaliny na jedné polovině kotle.

Průtočný průřez pro spaliny na celém kotli

$$S_{kanál,celk} = S_{kanálu} \cdot 4 \quad (53)$$

$$S_{kanál,celk} = 3,075 \cdot 4$$

$$S_{kanál,celk} = \underline{12,3 \text{ m}^2}$$

Stanovení rychlosti spalin

$$v_{sp} = \frac{V_{SP,efektiv}}{S_{kanál,celk}} \quad (54)$$

$$v_{sp} = \frac{90,041}{12,3}$$

$$v_{sp} = \underline{7,32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}$$

Přestup tepla na straně spalin

$$\alpha_k = c_z \cdot c_s \cdot c_f \cdot \alpha_n \quad (55)$$

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{SP}} \quad (56)$$

$$r_{H_2O} = \frac{0,492}{6,955}$$

$$r_{H_2O} = \underline{0,071}$$

$$\alpha_n = 55 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad \text{hodnota odečtena z nomogramu}$$

$$c_z = 1 \quad \text{hodnota odečtena z nomogramu}$$

$$c_s =$$

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} \quad (57)$$

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{D} \quad (58)$$

$$\sigma_2 = \frac{55}{42,4}$$

$$\sigma_1 = \frac{90}{42,4}$$

$$\sigma_2 = \underline{1,297}$$

$$\sigma_1 = \underline{2,123}$$

$$c_s = 0,94 \quad \text{hodnota odečtena z nomogramu}$$

$$c_f = 1,14 \quad \text{hodnota odečtena z nomogramu}$$

$$\alpha_k = 1 \cdot 0,94 \cdot 1,14 \cdot 55$$

$$\alpha_k = \underline{58,938 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$\alpha_s$  můžeme zanedbat, hranicí pro sálání je teplota spalin 500°C.

$$\alpha_{SP} = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_s \quad (59)$$

$$\alpha_{SP} = 1 \cdot 58,938 + 0$$

$$\alpha_{SP} = \underline{58,938 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}$$

#### Přestup tepla na straně vzduchu

*Jelikož je rychlost vzduchu velice nízká, budu počítat i s variantou čtyřnásobné rychlosti vzduchu a dle velikosti teplosměnné plochy se rozhodnu pro jednu z variant.*

$$\alpha_k = c_l \cdot c_{f'} \cdot \alpha_n \quad (60)$$

$$\alpha_{k4x} = c_l \cdot c_{f'} \cdot \alpha_{n4x} \quad (61)$$

$$\alpha_n = 11,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\alpha_{n4x} = 30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_l =$$

$$\frac{l}{D_e} = \frac{1620}{37,2} = \underline{43,548} \quad (62)$$

$$c_l = 1,01 \quad \text{hodnota odečtena z nomogramu}$$

$$c_{f'} = 1,14 \quad \text{hodnota odečtena z nomogramu}$$

$$\alpha_k = 1,01 \cdot 1,14 \cdot 11,8$$

$$\alpha_k = \underline{13,587 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$\alpha_{k4x} = 1,01 \cdot 1,14 \cdot 30$$

$$\alpha_{k4x} = \underline{34,542 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$\alpha_{VZ} = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_s \quad (63)$$

$$\alpha_{VZ} = 1 \cdot 13,587 + 0$$

$$\alpha_{VZ} = \underline{13,587 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$\alpha_{VZ4x} = \omega \cdot \alpha_{k4x} + \alpha_s \quad (64)$$

$$\alpha_{VZ4x} = 1 \cdot 34,542 + 0$$

$$\alpha_{VZ4x} = \underline{34,542 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_{SP} \cdot \alpha_{VZ}}{\alpha_{SP} + \alpha_{VZ}} \quad (65)$$

$$k = 0,85 \cdot \frac{58,938 \cdot 13,587}{58,938 + 13,587}$$

$$k = \underline{9,385 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$k_{4x} = \xi \cdot \frac{\alpha_{SP} \cdot \alpha_{VZ4x}}{\alpha_{SP} + \alpha_{VZ4x}} \quad (66)$$

$$k_{4x} = 0,85 \cdot \frac{58,938 \cdot 34,542}{58,938 + 34,542}$$

$$k_{4x} = \underline{18,512 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}$$

Pro rychlost vzduchu  $v_{vzduchu} = 2,156 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  vychází počet trubek pro výměník:

$$n_{trubek} = 22 \cdot 19 \cdot 2 \cdot 4 = \underline{3344}$$

Pro rychlost vzduchu  $v_{vzduchu} = 8,624 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  vychází počet trubek pro výměník:

$$n_{trubek} = 5 \cdot 19 \cdot 2 \cdot 4 = \underline{760}$$

Vnitřní průměr trubky  $d_{vnitřní} = 37,2 \text{ mm}$

$$\text{Vnitřní průřez trubky } S_{vnitřní} = \pi \cdot \frac{d_{vnitřní}^2}{4} = \underline{1,086 \cdot 10^{-3}}$$

Celkový průtočný průměr pro vzduch

$$S_{vz,průtok} = S_{vnitřní} \cdot n_{trubek} \quad (67)$$

$$\text{Pro } v_{vzduchu} = 2,156 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}: \quad S_{vz,průtok} = 1,086 \cdot 10^{-3} \cdot 3344$$

$$S_{vz,průtok} = \underline{3,631 \text{ m}^2}$$

$$\text{Pro } v_{vzduchu} = 8,624 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}: \quad S_{vz,průtok} = 1,086 \cdot 10^{-3} \cdot 760$$

$$S_{vz,průtok} = \underline{0,825 \text{ m}^2}$$

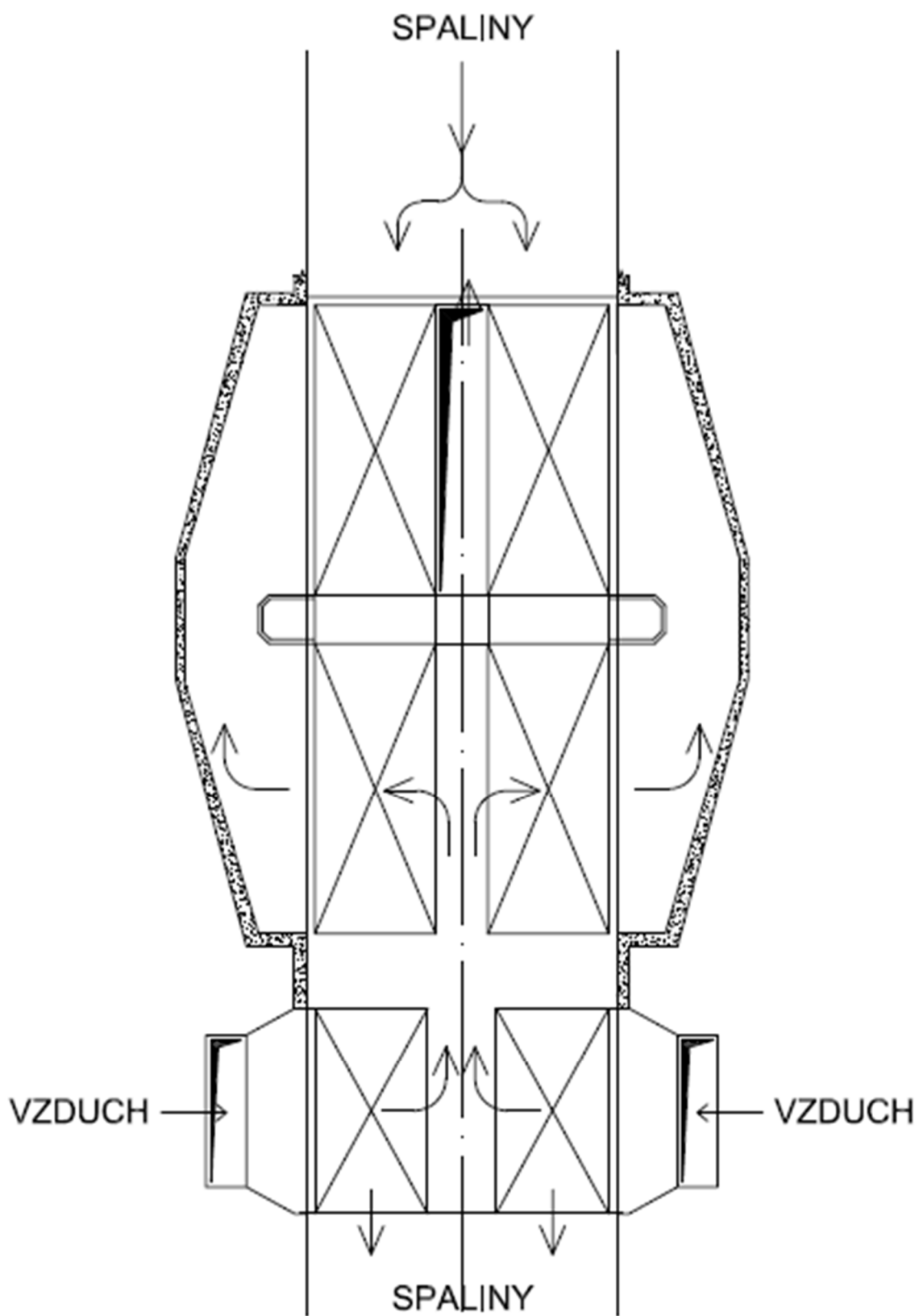
Pro  $v_{vzduchu} = 2,156 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  stanovíme teplosměnnou plochu:

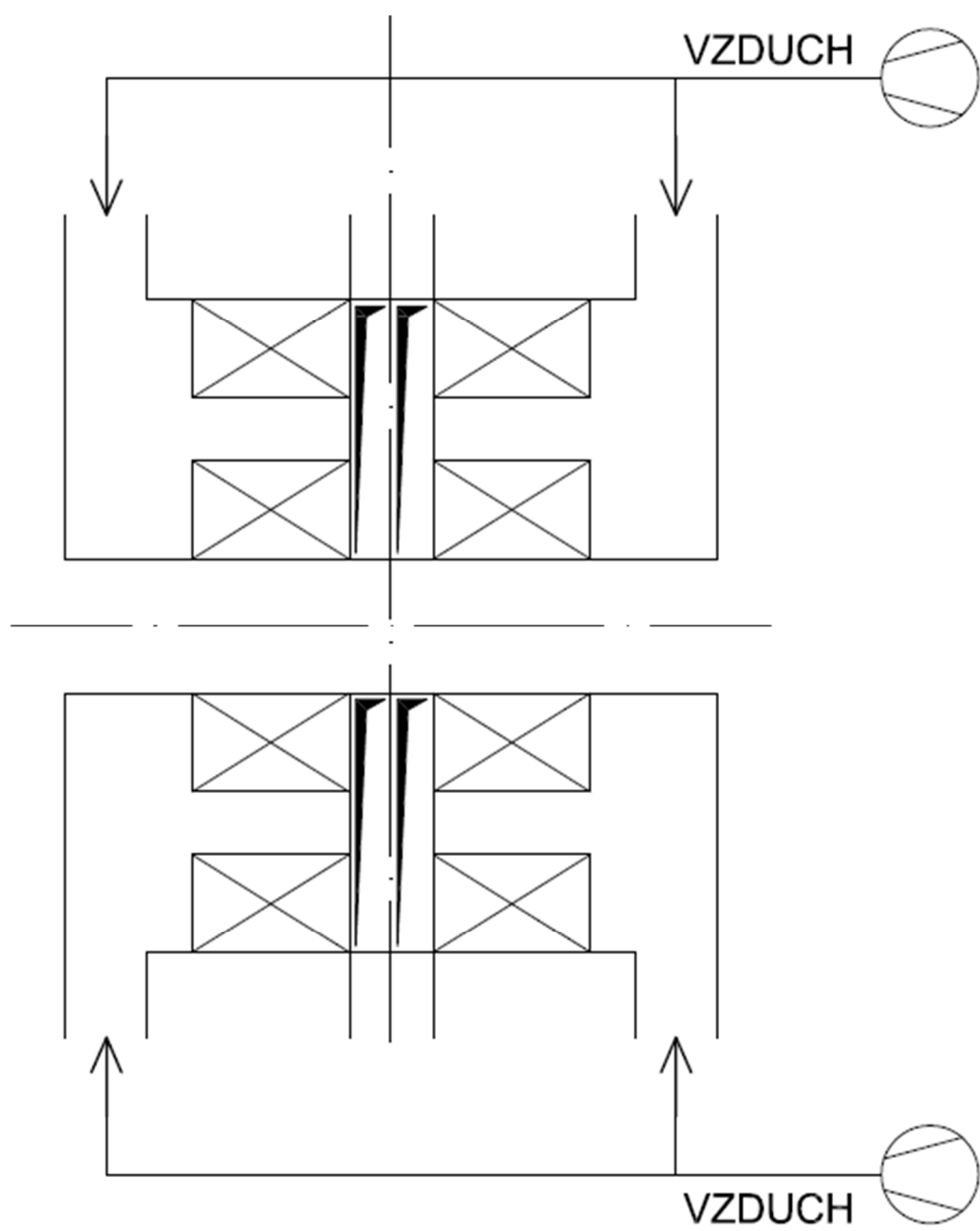
$$k \cdot S = 9,385 \cdot 3,631 = 34,08 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}$$

Pro  $v_{vzduchu} = 8,624 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  stanovíme teplosměnnou plochu:

$$k \cdot S = 18,512 \cdot 0,825 = 15,27 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}$$

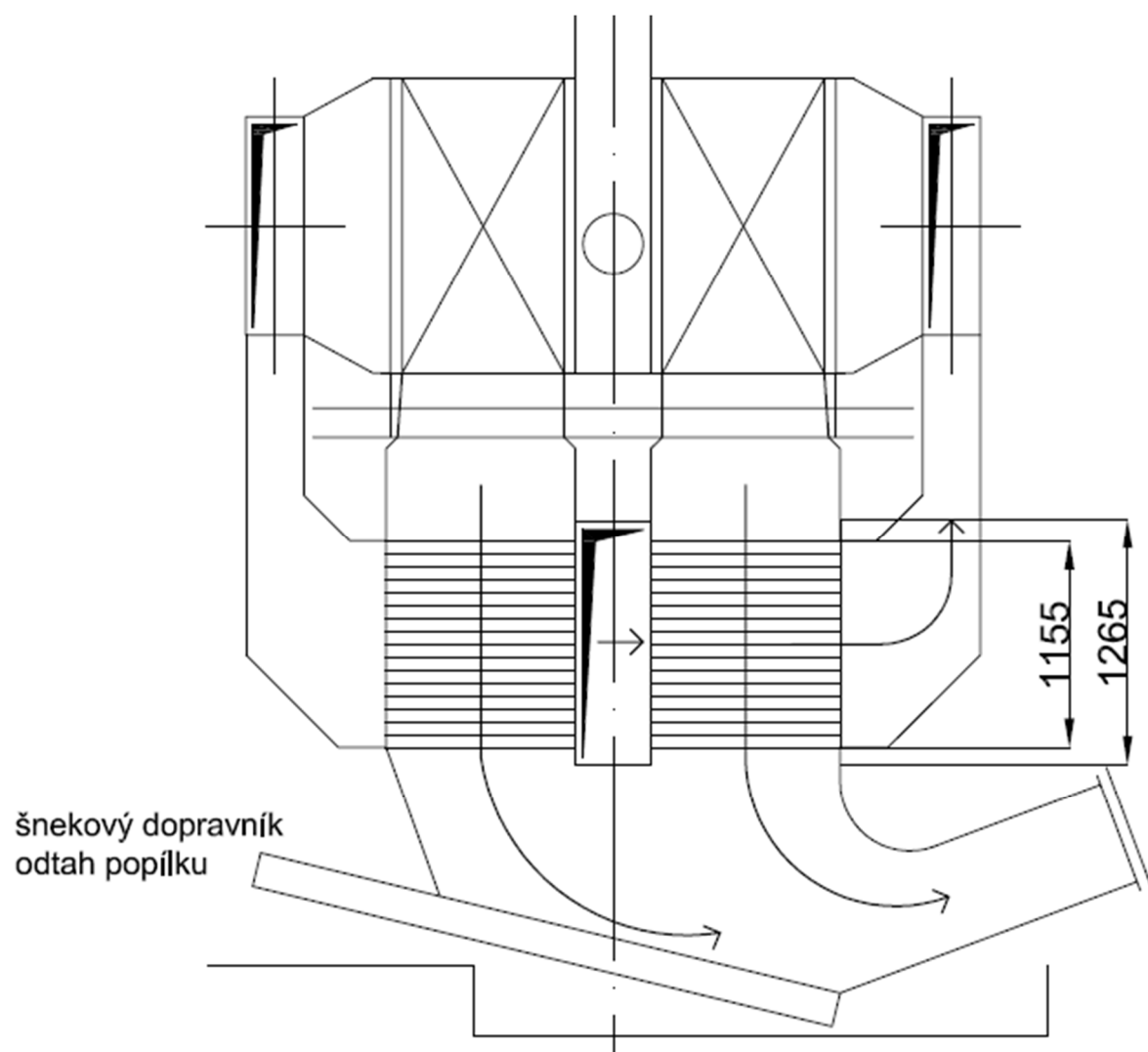
*Stávající stav ohřívaču vzduchu*

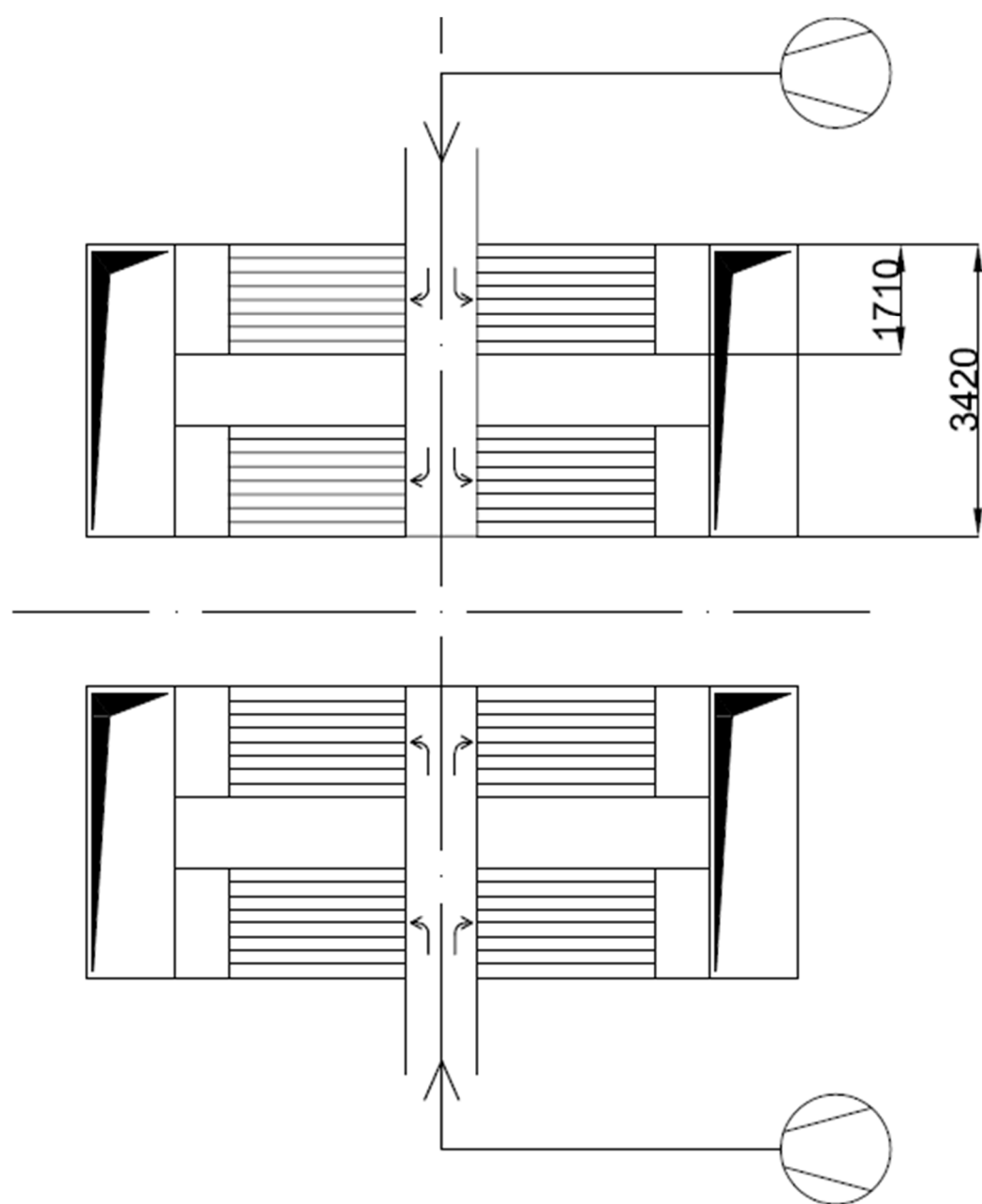






*Navrhovaný stav ohříváku vzduchu*





Podle velikosti teplosměnné plochy volím rychlost vzduchu  $2,156 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , protože zde předpokládáme větší vychlazení spalin. Protože není k dispozici program pro výpočet kotle, v dalším postupu budeme dimenzovat plochu zkusmo podle volených teplot, kritériem bude rovnost dosažených výkonů.

1) Stanovíme si ochlazení spalin ze  $150^\circ\text{C}$  na  $145^\circ\text{C}$

$$Q_{SP} = Q_{VZ}$$

$$Q_{SP} = V_{SP} \cdot c_v \cdot (t_{sp1} - t_{sp2}) \quad (68)$$

$$Q_{SP} = 6,955 \cdot 1,38 \cdot (150 - 145)$$

$$Q_{SP} = \underline{47,99 \text{ kW}}$$

$$Q_{VZ} = V_{VZ} \cdot c_v \cdot (t_{vz1} - t_{vz2}) \quad (69)$$

$$t_{vz1} = \frac{Q_{VZ} + v \cdot c_v \cdot t_{vz2}}{v \cdot c_v}$$

$$t_{vz1} = \frac{47,99 + 7,83 \cdot 1,005 \cdot 50}{7,83 \cdot 1,005}$$

$$t_{vz1} = \underline{56,1^\circ\text{C}}$$

Předpokladem je  $Q_{SP} = Q_{VZ} = Q$

$$Q = k \cdot S \cdot \Delta T_{\log} \quad (70)$$

$$Q = k \cdot S \cdot \frac{(t_{sp2} - t_{vz2}) - (t_{sp1} - t_{vz1})}{\ln \frac{t_{sp2} - t_{vz2}}{t_{sp1} - t_{vz1}}}$$

$$Q = 34,08 \cdot \frac{(145 - 50) - (150 - 56,1)}{\ln \frac{145 - 50}{150 - 56,1}}$$

$$Q = \underline{3218,82 \text{ kW}}$$

$$Q \neq Q_{sp}$$

2) Stanovíme si ochlazení spalin ze  $150^\circ\text{C}$  na  $140^\circ\text{C}$

$$Q_{SP} = V_{SP} \cdot c_v \cdot (t_{sp1} - t_{sp2})$$

$$Q_{SP} = 6,955 \cdot 1,38 \cdot (150 - 140)$$

$$Q_{SP} = \underline{95,98 \text{ kW}}$$

$$Q_{VZ} = V_{VZ} \cdot c_v \cdot (t_{vz1} - t_{vz2})$$

$$t_{vz1} = \frac{Q_{VZ} + v \cdot c_v \cdot t_{vz2}}{v \cdot c_v}$$

$$t_{vz1} = \frac{95,98 + 7,83 \cdot 1,005 \cdot 50}{7,83 \cdot 1,005}$$

$$t_{vz1} = \underline{62,2^\circ\text{C}}$$

Předpokladem je  $Q_{SP} = Q_{VZ} = Q$

$$Q = k \cdot S \cdot \Delta T_{log}$$

$$Q = k \cdot S \cdot \frac{(t_{sp2} - t_{vz2}) - (t_{sp1} - t_{vz1})}{\ln \frac{t_{sp2} - t_{vz2}}{t_{sp1} - t_{vz1}}}$$

$$Q = 34,08 \cdot \frac{(140 - 50) - (150 - 62,2)}{\ln \frac{140 - 50}{150 - 62,2}}$$

$$Q = \underline{3029,56 \text{ kW}}$$

$$Q \neq Q_{sp}$$

- 3) Stanovíme si ochlazení spalín ze  $150^\circ\text{C}$  na  $120^\circ\text{C}$ . Pod tuto teplotu již nemůžeme jít, kvůli rosnému bodu, který je stanoven na hodnotě  $110^\circ\text{C}$ ,  $10^\circ\text{C}$  je uvažováno na ochlazení kanálu až po odsířování.

$$Q_{SP} = V_{SP} \cdot c_v \cdot (t_{sp1} - t_{sp2})$$

$$Q_{SP} = 6,955 \cdot 1,38 \cdot (150 - 120)$$

$$Q_{SP} = \underline{287,9 \text{ kW}}$$

$$Q_{VZ} = V_{VZ} \cdot c_v \cdot (t_{vz1} - t_{vz2})$$

$$t_{vz1} = \frac{Q_{VZ} + v \cdot c_v \cdot t_{vz2}}{v \cdot c_v}$$

$$t_{vz1} = \frac{287,9 + 7,83 \cdot 1,005 \cdot 50}{7,83 \cdot 1,005}$$

$$t_{vz1} = \underline{86,6^\circ\text{C}}$$

Předpokladem je  $Q_{SP} = Q_{VZ} = Q$

$$Q = k \cdot S \cdot \Delta T_{log}$$

$$Q = k \cdot S \cdot \frac{(t_{sp2} - t_{vz2}) - (t_{sp1} - t_{vz1})}{\ln \frac{t_{sp2} - t_{vz2}}{t_{sp1} - t_{vz1}}}$$

$$Q = 34,08 \cdot \frac{(120 - 50) - (150 - 86,6)}{\ln \frac{120 - 50}{150 - 86,6}}$$

$$Q = \underline{2271,3 \text{ kW}}$$

$$Q \neq Q_{sp}$$

- 4) Jelikož  $Q \neq Q_{sp}$ , musíme tedy snížit teplosměnnou plochu  $k \cdot S = 15,27 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}$  ( viz str. 44) dle čtyřnásobné rychlosti vzduchu. Postup výpočtu budeme opakovat.

Stanovíme si ochlazení spalín ze  $150^\circ\text{C}$  na  $145^\circ\text{C}$

$$Q_{SP} = V_{SP} \cdot c_v \cdot (t_{sp1} - t_{sp2})$$

$$Q_{SP} = 6,955 \cdot 1,38 \cdot (150 - 145)$$

$$Q_{SP} = \underline{47,99 \text{ kW}}$$

$$Q_{VZ} = V_{VZ} \cdot c_v \cdot (t_{vz1} - t_{vz2})$$

$$t_{vz1} = \frac{Q_{VZ} + v \cdot c_v \cdot t_{vz2}}{v \cdot c_v}$$

$$t_{vz1} = \frac{47,99 + 7,83 \cdot 1,005 \cdot 50}{7,83 \cdot 1,005}$$

$$t_{vz1} = \underline{56,1^\circ\text{C}}$$

*Předpokladem je  $Q_{SP} = Q_{VZ} = Q$*

$$Q = k \cdot S \cdot \Delta T_{\log}$$

$$Q = k \cdot S \cdot \frac{(t_{sp2} - t_{vz2}) - (t_{sp1} - t_{vz1})}{\ln \frac{t_{sp2} - t_{vz2}}{t_{sp1} - t_{vz1}}}$$

$$Q = 15,27 \cdot \frac{(145 - 50) - (150 - 56,1)}{\ln \frac{145 - 50}{150 - 56,1}}$$

$$Q = \underline{1442,23 \text{ kW}}$$

$$Q \neq Q_{sp}$$

5) *Stanovíme si ochlazení spalin ze  $150^\circ\text{C}$  na  $130^\circ\text{C}$*

$$Q_{SP} = V_{SP} \cdot c_v \cdot (t_{sp1} - t_{sp2})$$

$$Q_{SP} = 6,955 \cdot 1,38 \cdot (150 - 130)$$

$$Q_{SP} = \underline{191,96 \text{ kW}}$$

$$Q_{VZ} = V_{VZ} \cdot c_v \cdot (t_{vz1} - t_{vz2})$$

$$t_{vz1} = \frac{Q_{VZ} + v \cdot c_v \cdot t_{vz2}}{v \cdot c_v}$$

$$t_{vz1} = \frac{191,96 + 7,83 \cdot 1,005 \cdot 50}{7,83 \cdot 1,005}$$

$$t_{vz1} = \underline{74,4^\circ\text{C}}$$

*Předpokladem je  $Q_{SP} = Q_{VZ} = Q$*

$$Q = k \cdot S \cdot \Delta T_{\log}$$

$$Q = k \cdot S \cdot \frac{(t_{sp2} - t_{vz2}) - (t_{sp1} - t_{vz1})}{\ln \frac{t_{sp2} - t_{vz2}}{t_{sp1} - t_{vz1}}}$$

$$Q = 15,27 \cdot \frac{(130 - 50) - (150 - 74,4)}{\ln \frac{130 - 50}{150 - 74,4}}$$

$$Q = \underline{1187,69 \text{ kW}}$$

$$Q \neq Q_{sp}$$

6) Stanovíme si ochlazení spalin ze 150°C na 120°C

$$\begin{aligned} Q_{SP} &= V_{SP} \cdot c_v \cdot (t_{sp1} - t_{sp2}) \\ Q_{SP} &= 6,955 \cdot 1,38 \cdot (150 - 120) \\ Q_{SP} &= \underline{287,9 \text{ kW}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{VZ} &= V_{VZ} \cdot c_v \cdot (t_{vz1} - t_{vz2}) \\ t_{vz1} &= \frac{Q_{VZ} + v \cdot c_v \cdot t_{vz2}}{v \cdot c_v} \\ t_{vz1} &= \frac{287,9 + 7,83 \cdot 1,005 \cdot 50}{7,83 \cdot 1,005} \\ t_{vz1} &= \underline{86,6^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

Předpokladem je  $Q_{SP} = Q_{VZ} = Q$

$$\begin{aligned} Q &= k \cdot S \cdot \Delta T_{log} \\ Q &= k \cdot S \cdot \frac{(t_{sp2} - t_{vz2}) - (t_{sp1} - t_{vz1})}{\ln \frac{t_{sp2} - t_{vz2}}{t_{sp1} - t_{vz1}}} \\ Q &= 15,27 \cdot \frac{(120 - 50) - (150 - 86,6)}{\ln \frac{120 - 50}{150 - 86,6}} \\ Q &= \underline{1017,68 \text{ kW}} \end{aligned}$$

$$Q \neq Q_{sp}$$

Jelikož nebyl splněn předpoklad  $Q_{SP} = Q_{VZ} = Q$ , musím upravit plochu ohříváku vzduchu.

$$\begin{aligned} S &= \frac{Q}{k \cdot \Delta T_{log}} \\ S &= \frac{191,96}{18,512 \cdot 77,78} \\ S &= \underline{0,133 \text{ m}^2} \end{aligned}$$

$$k \cdot S = 18,512 \cdot 0,133 = 2,46$$

Při ochlazení spalin ze 150°C na 130°C

$$\begin{aligned} Q_{SP} &= V_{SP} \cdot c_v \cdot (t_{sp1} - t_{sp2}) \\ Q_{SP} &= 6,955 \cdot 1,38 \cdot (150 - 130) \\ Q_{SP} &= \underline{191,96 \text{ kW}} \end{aligned}$$

$$Q_{VZ} = V_{VZ} \cdot c_v \cdot (t_{vz1} - t_{vz2})$$

$$t_{vz1} = \frac{Q_{VZ} + v \cdot c_v \cdot t_{vz2}}{v \cdot c_v}$$

$$t_{vz1} = \frac{191,96 + 7,83 \cdot 1,005 \cdot 50}{7,83 \cdot 1,005}$$

$$t_{vz1} = \underline{74,4^\circ\text{C}}$$

*Předpokladem je  $Q_{SP} = Q_{VZ} = Q$*

$$Q = k \cdot S \cdot \Delta T_{log}$$

$$Q = k \cdot S \cdot \frac{(t_{sp2} - t_{vz2}) - (t_{sp1} - t_{vz1})}{\ln \frac{t_{sp2} - t_{vz2}}{t_{sp1} - t_{vz1}}}$$

$$Q = 2,46 \cdot \frac{(130 - 50) - (150 - 74,4)}{\ln \frac{130 - 50}{150 - 74,4}}$$

$$Q = \underline{191,34 \text{ kW}}$$

$$Q = Q_{sp}$$

*Jelikož plocha ohříváku je příliš malá, zvolíme jiný tepelný výkon pro úpravu plochy s teplotou spalin  $120^\circ\text{C}$ .*

$$S = \frac{Q}{k \cdot \Delta T_{log}}$$

$$S = \frac{287,9}{18,512 \cdot 66,65}$$

$$S = \underline{0,233 \text{ m}^2}$$

$$k \cdot S = 18,512 \cdot 0,233 = 4,31$$

*Při ochlazení spalin ze  $150^\circ\text{C}$  na  $120^\circ\text{C}$*

$$Q_{SP} = V_{SP} \cdot c_v \cdot (t_{sp1} - t_{sp2})$$

$$Q_{SP} = 6,955 \cdot 1,38 \cdot (150 - 120)$$

$$Q_{SP} = \underline{287,9 \text{ kW}}$$

$$Q_{VZ} = V_{VZ} \cdot c_v \cdot (t_{vz1} - t_{vz2})$$

$$t_{vz1} = \frac{Q_{VZ} + v \cdot c_v \cdot t_{vz2}}{v \cdot c_v}$$

$$t_{vz1} = \frac{287,9 + 7,83 \cdot 1,005 \cdot 50}{7,83 \cdot 1,005}$$

$$t_{vz1} = \underline{86,6^\circ\text{C}}$$

*Předpokladem je  $Q_{SP} = Q_{VZ} = Q$*

$$Q = k \cdot S \cdot \Delta T_{log}$$

$$Q = k \cdot S \cdot \frac{(t_{sp2} - t_{vz2}) - (t_{sp1} - t_{vz1})}{\ln \frac{t_{sp2} - t_{vz2}}{t_{sp1} - t_{vz1}}}$$

$$Q = 4,31 \cdot \frac{(120 - 50) - (150 - 86,6)}{\ln \frac{120 - 50}{150 - 86,6}}$$

$$Q = \underline{287,24 \text{ kW}}$$

$$Q = Q_{sp}$$

$$S_{vz,průtok} = S_{vnitř} \cdot n_{trub,svaz} \Rightarrow n_{trub,svaz} = \frac{S_{vz,průtok}}{S_{vnitř}} = \frac{0,233}{1,086 \cdot 10^{-3}} = 214,55$$

$$n_{trubek,celk.,v \text{ řadě}} = \frac{214,55}{19 \cdot 2 \cdot 4} = \underline{1,4} \text{ volíme 2 řady trubek.}$$

*Rychlost vzduchu*

$$v = \frac{V_{vz,efek}}{S_{vz,průtok}}$$

$$v = \frac{0,536}{1,086 \cdot 10^{-3} \cdot 38}$$

$$v = \underline{12,99 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}$$



## Závěr

*Diplomová práce se zabývá zvýšením účinnosti kotle o výkonu 210t/h při spalování černého uhlí.*

*Z několika variant, které jsou k dispozici, jsem zvolila možnost, která používá teplo odchozích spalin za stávajícím ohřívákem vzduchu k většímu ohřátí veškerého vzduchu. Jelikož je ale prostor pod stávajícím ohřívákem vzduchu stísněný, postupovala jsem v tomto projektu tak, že jsem navrhla ohřívák vzduchu takové velikosti, která se do daného prostoru vejde a podle výkonu navrženého ohříváku jsem určila ochlazení spalin a ohřev vzduchu.*

*Z uvedených zjednodušených výpočtů vyplývá, že lze dosáhnout ochlazení spalin až na 120 °C při ohřevu vzduchu z 50 °C na 86,6 °C. Naznačené dispoziční řešení potvrzuje reálnost uvažovaného provedení. Nicméně je třeba si uvědomit, že tyto přepočty jsem provedla pouze v rozsahu přídatné nové teplosměnné plochy a nezohlednila jsem vliv zvýšení teploty vzduchu vstupujícího do stávajícího ohříváku.*

*Jak již bylo uvedeno, neměla jsem k dispozici program pro tepelný výpočet kotle, takže vliv zvýšené teploty vzduchu na tepelný výkon stávajícího ohříváku vzduchu mohu posoudit jen odhadem. Zjednodušeně (protože jsem neměla k dispozici podklady) lze usoudit, že při zvýšené teplotě vzduchu z 50 °C na 86,6 °C by se teplota spalin na vstupu do přídatné plochy zvýšila ze 150 °C na cca 180°C a výstupní teplota spalin z přídatného ohříváku by se z předpokládaných 120 °C zvýšila na hodnotu blízkou 150°C. Lze tedy očekávat, že by se na výstupu z kotle dosáhla teplota nižší než 150 °C, ale snížení by bylo řádově ve stupních Celsia.*

*Dosažený efekt z hlediska dosažené účinnosti by nebyl vyvážen rekonstrukcí kotle a z toho důvodu bych nedoporučila tuto alternativu k realizaci.*

## Použitá literatura

- [1] VILIMEC, Ladislav. *Řízení a regulace energetických zařízení. Skripta VŠB TU Ostrava*, 2008. ISBN 978-80-248-1853-5.
- [2] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků. Skripta ČVUT Praha*, 2002. ISBN 80-010-2035-5.
- [3] IBLER, Zbyněk. *Technický průvodce energetika. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura*, 2002, 615 s. ISBN 80-730-0026-1.
- [4] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů I. Skripta VŠB TU Ostrava*, 2012. ISBN 978-80-248-2550-2.
- [5] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů II. Skripta VŠB TU Ostrava*, 2012. ISBN 978-80-248-1716-3.
- [6] POLACH, Vladislav. *Parní kotle. Skripta ZČU Plzeň*, 2011.
- [7] TZB-info [online]. 2013 [cit.2013-03-04]. Dostupné z: [www.tzb-info.cz](http://www.tzb-info.cz)
- [8] *Měření účinnosti a teplotních polí na kotli K10: Elektroteplárna Skawina – ČEZ Polska. 2012*
- [9] VILIMEC, Ladislav a Jiří JOSIEK. *Materiály a pevnostní dimenzování částí parních generátorů. Skripta VŠB TU Ostrava*, 2011. ISBN 978-80-248-2512-0.
- [10] NOSKIEVIČ, Pavel. *Spalování uhlí. Skripta VŠB TU Ostrava*, 2002. ISBN 80-248-0204-X.
- [11] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří Teyssler. *Parní kotle. Praha 1983. DT 621.18.*

## Seznam příloh

*Příloha č.1 - Měrná entalpie složek spalin v závislosti na teplotě*

*Příloha č.2 - Střední měrné tepelné kapacity složek spalin*

*Příloha č.3 - Přisávání v mlecím okruhu*

*Příloha č.4 - Zvětšení součinitele přebytku vzduchu vlivem netěsností*

*Příloha č.5 - Podíl spalitelných látek v tuhých zbytcích*

*Příloha č.6 - Bilance popela*

*Příloha č.7 - Ztráta chemickým nedopalem*

*Příloha č.8 - Nomogram pro určení součinitele přestupu tepla pro vystřídané  
uspořádání trubek*

*Příloha č. 9 – Výškový řez kotlem – TD Skawina*

*Příloha č. 10 – Výškový řez zadním tahem – TD Skawina*

## Seznam výkresů

*Výkres č. 1 – stávající stav*

*Výkres č. 2 – Navrhovaná stav kotle – alternativa s vysokým svazkem*

*Výkres č. 3 – Navrhovaný stav kotle – alternativa s nízkým svazkem*

## Příloha č. 1

*Měrná entalpie složek spalín v závislosti na teplotě [2]*

$t [^{\circ}\text{C}]$	$\text{CO}_2$	$\text{SO}_2$	$\text{N}_2$	$\text{Ar}$	$\text{H}_2\text{O}$	vzduch suchý	$\text{CO}$	$\text{O}_2$	popílek [kJ/kg]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	41,62	46,81	32,53	23,32	39,10	32,57	32,49	32,78	20,20
100	170,0	191,2	129,5	93,07	150,6	132,3	132,3	131,7	80,4
200	357,5	394,1	259,9	186,0	304,5	266,2	261,4	267,0	170,0
300	558,8	610,4	392,1	278,8	462,8	402,5	395,0	406,8	264,6
400	771,9	836,5	526,7	371,7	625,9	541,7	531,7	550,9	361,6
500	994,4	1070	664,0	464,7	794,5	684,1	671,6	698,7	459,5
600	1225	1310	804,3	557,3	968,8	829,6	814,3	849,9	558,0
700	1462	1554	947,3	650,2	1149	978,1	960,4	1003	658,3
800	1705	1801	1093	743,1	1335	1129	1109	1159	760,8
900	1952	2052	1241	835,7	1526	1283	1260	1318	868,4
1000	2203	2304	1392	928,2	1723	1439	1413	1477	982,8
1100	2458	2540	1544	1020	1925	1597	1567	1638	1106
1200	2716	2803	1698	1114	2132	1756	1723	1802	1240
1300	2976	3063	1853	1207	2344	1916	1881	1965	1386
1400	3239	3323	2009	1300	2559	2077	2040	2129	1543
1500	3503	3587	2166	1393	2779	2240	2199	2293	1710
1600	3769	3838	2325	1577	3002	2403	2359	2465	2061
1800	4305	4363	2643	1742	3458	2732	2682	2804	2381
2000	4844	4890	2965	1857	3925	3065	3008	3138	2500
2500	6204	6205	3778	2321	5132	3909	3830	4006	-

## Příloha č. 2

*Střední měrné tepelné kapacity složek spalin [3]*

t [°C]	$c_{so}$ [kJ/m <sup>3</sup> K]									$c_{pop}$ [kJ/kg K]
	$O_2$	$N_2$	$CO_2$	$CO$	$H_2$	$SO_2$	$CH_4$	vzduch	vodní pára	
0	1,3063	1,3012	1,6203	1,3012	1,2812	1,7792	1,5407	1,2979	1,4905	0,808
100	1,3188	1,3021	1,7250	1,3021	1,2937	1,8631	1,7543	1,3021	1,4989	0,808
200	1,3356	1,3105	1,8171	1,3105	1,2979	1,9427	1,9971	1,3105	1,5198	0,8455
300	1,3565	1,3147	1,8924	1,3188	1,3021	2,0010	2,2692	1,3188	1,5366	0,8793
400	1,3816	1,3272	1,9552	1,3314	1,3021	2,0725	2,4953	1,3314	1,5575	0,90025
500	1,4026	1,3356	2,0222	1,3440	1,3063	2,1227	2,7256	1,3440	1,5826	0,9168
600	1,4193	1,3482	2,0767	1,3607	1,3105	2,1688	2,9224	1,3565	1,6077	0,93366
700	1,4361	1,3607	2,1227	1,3733	1,3105	2,2063	3,1024	1,3733	1,6329	0,946143
800	1,4528	1,3733	2,1646	1,3900	1,3188	2,2240	3,2490	1,3858	1,6622	0,95875
900	1,4696	1,3858	2,2023	1,4026	1,3230	2,2736	3,4039	1,3984	1,6915	0,9722
1000	1,4821	1,3984	2,2358	1,4151	1,3272	2,2944	3,5379	1,4110	1,7166	0,9839
1200	1,5031	1,4235	2,2944	1,4403	1,3440	2,3404		1,4361	1,7668	1,072
1400	1,5240	1,4445	2,3404	1,4612	1,3607	2,3739		1,4528	1,8171	1,140
1600	1,5407	1,4612	2,3823	1,4779	1,3733	2,3990		1,4738	1,8631	1,184
1800	1,5575	1,4479	2,4158	1,4905	1,3900	2,4242		1,4863	1,9050	1,226

### Příloha č. 3

#### *Prisávání v mlecím okruhu [2]*

Způsob mletí uhlí		$\Delta\alpha_{ml}$ [-]
Trubnaté mlýny	se zásobníkem prášku při sušení vzduchem	0,10
	se zásobníkem prášku při sušení směsí vzduchu a spalín	0,12
	přímé foukání	0,04
Tlukadlové mlýny	podtlakový provoz	0,04
	přetlakový provoz	0
Středněběžné mlýny s podtlakovým provozem		0,04
Ventilátorové mlýny		0,10 ÷ 0,20

## Příloha č. 4

### Zvětšení součinitele přebytku vzduchu vlivem netěsností [2]

Průtah			$\Delta\alpha$
Ohniště			0,050 <sup>*)</sup>
Druhý tah dvoutahové spalovací komory granulačního kotle			0,015 <sup>*)</sup>
Průtahy kotelních svazků	mříž, deskový přk., 1. kotlový svazek	kotle o velkém a stř. parním výkonu	0,000 <sup>*)</sup>
	druhý a třetí kotlový svazek		0,025 <sup>*)</sup>
Kotel + přehřívák bez ohříváku vzduchu (malé kotle)			0,050 <sup>*)</sup>
Přehříváky a přihříváky	u menších kotlů		0,050 <sup>*)</sup>
	u větších kotlů (se zvláštním přehřívákovým tahem)		0,010 ÷ 0,020 <sup>*)</sup>
	vícedílný přehřívák na 1. díl		0,010 ÷ 0,030 <sup>*)</sup>
	vícedílný přihřívák na 1. díl		0,010 ÷ 0,030 <sup>*)</sup>
Ohříváky vody	ocelové trubkové ohříváky kotlů s velkým výkonem	jednodílné	0,010 ÷ 0,020 <sup>*)</sup>
		dvoudílné (na každý díl)	0,015 ÷ 0,025 <sup>*)</sup>
	ocelové trubkové ohříváky vody kotlů jm. výkonu do 12 t/h		0,040 <sup>*)</sup>
	litinové ohříváky vody (žebrové)		0,050 <sup>*)</sup>
Ohříváky vzduchu	trubkové	jednodílné	0,040 ÷ 0,050
		dvoudílné (na každý díl)	0,030 ÷ 0,040
	regenerativní (Ljungstroem)		0,010 ÷ 0,015
Odlučovač popílku	elektrostatický		0,100
	mechanický (žaluziový, skrubr)		0,025 ÷ 0,050
Kouřový kanál na 10 m délky	plechový, betonový		0,010
	zděný		0,050

Poznámka : Hodnoty označené <sup>\*)</sup> platí pro svařované oplechování. Pro těžkou zazdívku a lehkou zazdívku s rozebíratelným oplechováním se bere dvojnásobek těchto hodnot.



## Příloha č. 5

### Podíl spalitelných látek v tuhých zbytcích [2]

Ohniště		Uhlí	Podíl popela [-]		
			ve škváře $C_s$	v propadu $C_r$	v úletu $C_u$
Roštové	s pásovým roštem	hnědé	0,16	0,30	0,22
		černé	0,18	0,35	0,25
	s přesuvným roštem	hnědé	0,09	0,30	0,20
		černé	0,09	0,35	0,25
	s vratným roštem	hnědé	0,07	0,20	0,11
	s pásovým roštem s pohazováním	hnědé	0,08	0,25	0,20
		černé	0,12	0,30	0,28
Granulační	s tlukadlovými mlýny	hnědé	0,03 ÷ 0,10	-	0,01 ÷ 0,03
	šachtové a ventilátorové mlýny	hnědé	0,05 ÷ 0,15	-	0,005 ÷ 0,03
	ostatní	hnědé	0,01	-	0,03
		černé	0,02 ÷ 0,05	-	0,25–0,5 · $V^{daf}$
Tavicí		hnědé	0	-	0,02
		černé $V^{daf} < 0,25$	0	-	0,22–0,7 · $V^{daf}$
		uhlí $V^{daf} > 0,25$	0	-	0,09–0,18 · $V^{daf}$
Fluidní	se stacionární vrstvou		0,01	0,01	0,15 ÷ 0,20
	s cirkulující vrstvou		0,01	-	0,10 ÷ 0,15

kde  $V^{daf}$  [-] je podíl plynných látek v hořlavině

## Příloha č. 6

### Bilance popela [2]

Ohniště		Uhlí	Zrnění [mm]	Podíl zrn pod 2 mm	Podíl popela [-] <sup>*)</sup>		
					ve škváře $X_s$	v propadu $X_r$	v úletu $X_u$
Roštové	s pásovým roštem	hnědé	0 ÷ 30	0,25	0,74	0,06	0,15
		černé	0 ÷ 25	0,20	0,77	0,05	0,13
	s přesuvným roštem	hnědé	0 ÷ 30	0,3 ÷ 0,4	0,62	0 ÷ 0,06 <sup>**) </sup>	0,33 ÷ 0,27
		černé	0 ÷ 25	0,4	0,66	0 ÷ 0,06 <sup>**) </sup>	0,29 ÷ 0,23
	s vratným roštem	hnědé	0 ÷ 30	0,3 ÷ 0,4	0,60	0,03	0,32
	pásový rošt s pohazováním	hnědé	0 ÷ 30	0,40	0,68	-	0,27
		černé	0 ÷ 25	0,40			
Granulační	trubnatý a středo- běžný mlýn				0,08	-	0,87
	s ventilátorovými mlýny				0,15	-	0,80
	dvoutahová komora				0,20	-	0,75
	ostatní				0,10	-	0,85
Tavicí	jednoduché				0,40 ÷ 0,35	-	0,50 ÷ 0,35
	dvouprostorové				0,50 ÷ 0,40	-	0,40 ÷ 0,50
	cyklonové s vestavbou				0,80 ÷ 0,75	-	0,10 ÷ 0,15
	vertikální cyklonové bez vestavby				0,75 ÷ 0,70	-	0,15 ÷ 0,20
Fluidní	se stacionární vrstvou				0,60 ÷ 0,50	0,05	0,30 ÷ 0,40
	s cirkulující vrstvou				0,90 ÷ 0,85	-	0,05 ÷ 0,10

Poznámky :<sup>\*)</sup> Předpokládá se, že část popela se zplyní a část odchází ve velmi jemné frakci, která neobsahuje spalitelné látky. Tento zbytek do jednotky činí u výtavných ohnišť 0,1 , u ostatních typů 0,05.

<sup>\*\*)</sup>  Určí se podle toho, zda je instalováno zařízení na vrácení propadu.

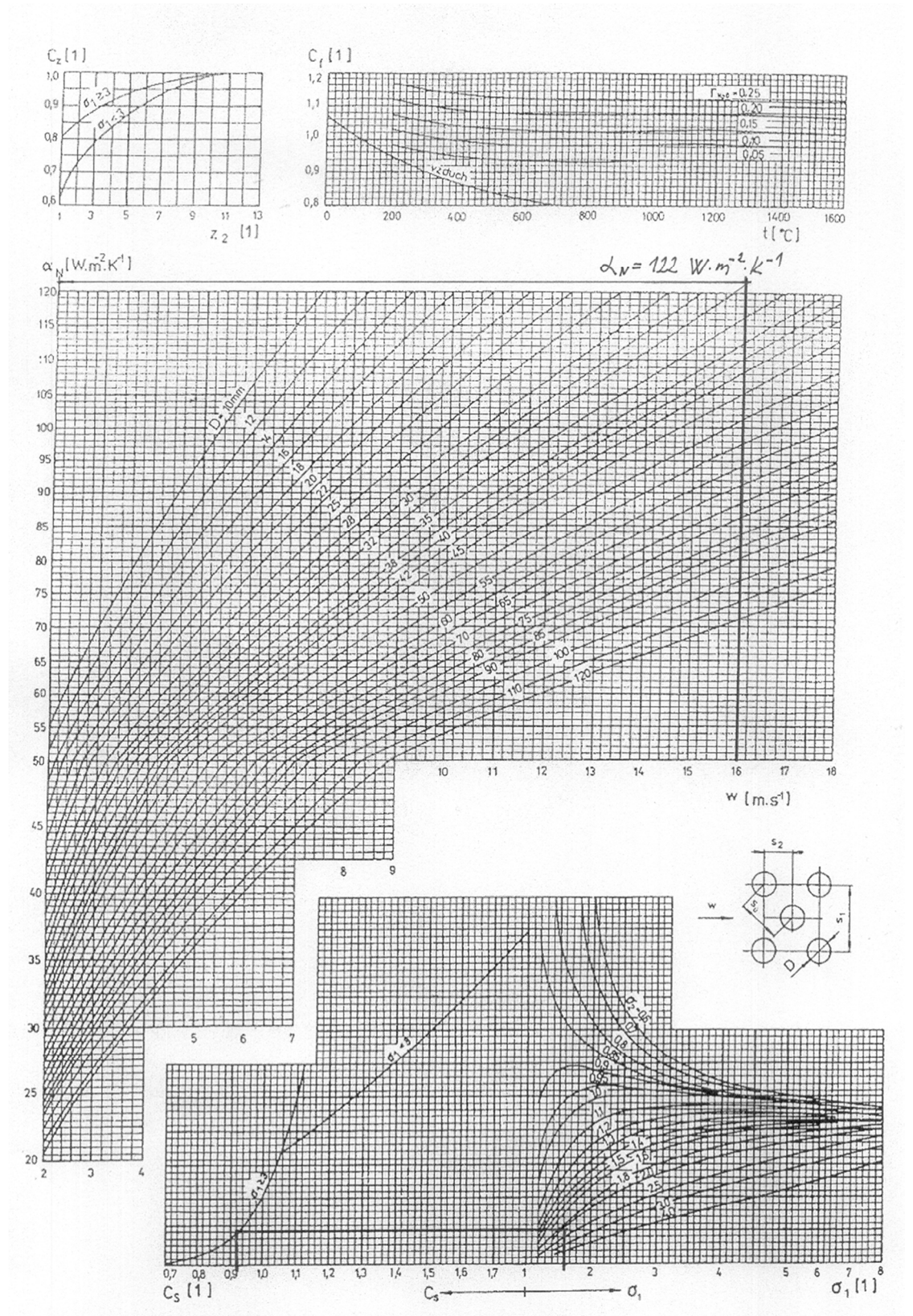
## Příloha č. 7

### Ztráta chemickým nedopalem [2]

Ohniště		Uhli	Ztráta $Z_{co}$ [-]
Roštové	s pásovým roštem		0,008 ÷ 0,01
	s přesuvným roštem		0,005 ÷ 0,01
	pásový rošt s pohazováním		0,005
	pevný rošt s pohazováním		0,01
Granulační	se šachtovými a ventilátorovými mlýny	lignit	0,01 ÷ 0,015
		hnědé	0,005 ÷ 0,01
		černé	0,005
	ostatní	lignit	0,007 ÷ 0,015
		hnědé	0,005 ÷ 0,01
		černé $V^{daf} \geq 0,25$	0,005
		černé $V^{daf} < 0,25$	0,003
Tavicí		hnědé	0,005 ÷ 0,007
		černé $V^{daf} \geq 0,25$	0,005 ÷ 0,007
		černé $V^{daf} < 0,25$	0,0
Fluidní		lignit	0,005 ÷ 0,01
		hnědé	max. 0,001
		černé	0,008 ÷ 0,01
Olejové			0,005 ÷ 0,01
Plynové	$Q_i < 12,5 \text{ MJ/Nm}^3$		0,005 ÷ 0,015
	$Q_i > 12,5 \text{ MJ/Nm}^3$		0,005 ÷ 0,01
Spalování dřeva			0,03 ÷ 0,07

## Příloha č. 8

Nomogram pro určení součinitele přestupu tepla pro vystřídané uspořádání trubek [2]



# Пříloha č. 9

